BRIAN GREENE

Por el autor de EL UNIVERSO ELEGANTE

LA REALIDAD OCULTA

UNIVERSOS PARALELOS
Y LAS PROFUNDAS LEYES DEL COSMOS



Del autor de los bestsellers *El universo elegante y El tejido del cosmos* llega su libro más ambicioso y accesible, una obra que aborda una de las preguntas de mayor complejidad: ¿es el nuestro el único universo?

Tenemos la intuición de que existe una entidad que engloba y contiene «todo». Es lo que tradicionalmente se ha denominado «Universo». No existe ninguna unidad conceptual más fundamental que ésta, aunque su naturaleza y relación con el espacio y el tiempo continúen siendo problemáticas. Eso sí, de lo que no parecía haber duda es de que el Universo, fuese lo que fuese, es único. Semejante creencia comenzó a ser socavada a mediados de la década de 1950, cuando para evitar el serio problema conceptual que implicaba aceptar que en el proceso de observación la naturaleza se manifiesta solo en una de las diferentes posibilidades físicas, se propuso la teoría de los «muchos universos»: las restantes posibilidades físicas se plasman en otros universos paralelos.

Ahora bien, la mecánica cuántica ya no es el único escenario teórico que la favorece, como muestra en este libro el distinguido físico teórico Brian Greene: «Veremos (…) que si el espacio se extiende indefinidamente –una proposición que es compatible con todas las observaciones– entonces debe haber dominios allá fuera (probablemente muy allá) donde copias de usted y de mí y de todo lo demás disfrutan de versiones alternativas de la realidad que experimentamos aquí».

Y no sustancia estas radicales afirmaciones a la manera de la ciencia ficción, sino basándose en la física más actual: en la teoría cosmológica inflacionaria y en diversas versiones de la teoría de cuerdas. Todo esto parece mera especulación, imaginación desbordada, pero la ciencia nos ha dado ya demasiadas muestras de que lo que es hoy es inimaginable mañana puede ser realidad.



Brian Greene

LA REALIDAD OCULTA

Universos paralelos y las profundas leyes del cosmos

ePub r1.4

Piolin 3.10.15

Título original: *The Hidden Reality: Parallel universes and the deep laws of the cosmos*

Brian Greene, 2011

Traducción: Javier García Sanz

Editor digital: Piolin

Corrección de erratas: koothrapali

ePub base r1.2







Para Alec y Sophia

Prefacio

Si había alguna duda a principios del siglo XX, a principios del siglo XXI era una certeza: cuando se trata de revelar la verdadera naturaleza de la realidad, la experiencia común es engañosa. A poco que reflexionemos, esto no es particularmente sorprendente. Cuando nuestros ancestros recolectaban en los bosques o cazaban en las sabanas, una capacidad para calcular el comportamiento cuántico de electrones o determinar las implicaciones cosmológicas de los agujeros negros no les habría ofrecido muchas ventajas para la supervivencia. Pero tener un cerebro más grande ofrecía ciertamente una ventaja, y a medida que crecían nuestras facultades intelectuales, también lo hacía nuestra capacidad para sondear más profundamente nuestros entornos. Algunos de nuestra especie construyeron equipos para extender el alcance de nuestros sentidos; otros desarrollaron un método sistemático para detectar y expresar pautas: las matemáticas. Con estas herramientas empezamos a mirar más allá de las apariencias cotidianas.

Lo que hemos encontrado ya ha requerido cambios importantes en nuestra imagen del cosmos. Mediante intuición física y rigor matemático, guiados y confirmados por experimentación y observación, hemos establecido que el espacio, el tiempo, la materia y la energía participan en un repertorio de comportamientos diferente de cualquier cosa de la que hayamos sido testigos directamente. Y ahora, análisis penetrantes de estos descubrimientos y otros relacionados nos están llevando a lo que puede ser la próxima revolución en el conocimiento: la po-

sibilidad de que nuestro universo no sea el único universo. *La realidad oculta* explora esta posibilidad.

Al escribir *La realidad oculta* no he supuesto ninguna formación en física o en matemáticas por parte del lector. Más bien, como en mis libros anteriores, he utilizado metáforas y analogías, intercaladas con episodios históricos, para dar una explicación ampliamente accesible de algunas de las más extrañas y, si se probaran correctas, más reveladoras ideas de la física moderna. Muchos de los conceptos cubiertos requieren que el lector abandone modos de pensamiento cómodos y acepte dominios de realidad imprevistos. Es un viaje que resulta sumamente excitante, y comprensible, por los giros y las vueltas científicos que han preparado el camino. He escogido juiciosamente entre éstos para llenar un paisaje de ideas que van por valles que se extienden desde lo cotidiano hasta lo absolutamente nada familiar.

Una diferencia respecto al enfoque de mis libros anteriores es que no he incluido capítulos preliminares que desarrollen sistemáticamente material de fondo, tal como relatividad especial y general, y mecánica cuántica. En su lugar, para la mayor parte, he introducido elementos de dichas disciplinas sólo sobre la base que «se necesita»; cuando encuentro en varios lugares que es necesario un desarrollo más completo para mantener el libro autocontenido, advierto al lector más experimentado e indico qué secciones puede pasar por alto sin problemas.

Por el contrario, las últimas páginas de algunos capítulos siguen un tratamiento más profundo del material, que algunos lectores pueden encontrar desafiante. Cuando entramos en dichas secciones ofrezco al lector menos experimentado un breve resumen y la opción de saltarse el resto sin pérdida de continuidad. Sin embargo, he animado a todos a leer estas secciones hasta donde el interés y la paciencia lo permitan. Aunque las descripciones son más complicadas, el material está escrito para

una amplia audiencia y por ello sigue teniendo como único prerrequisito la voluntad de perseverar.

A este respecto, las notas son diferentes. El lector novicio puede saltárselas por completo; el lector más experimentado encontrará en las notas aclaraciones o ampliaciones que considero importantes pero estimo demasiado pesadas para ser incluidas en los propios capítulos. Muchas de las notas están pensadas para lectores con alguna formación en matemáticas o en física.

Al escribir *La realidad oculta* me he beneficiado de comentarios críticos y retroalimentaciones por parte de varios amigos, colegas y familiares que han leído algunos o todos los capítulos del libro. Me gustaría dar las gracias especialmente a David Albert, Tracy Day, Richard Easther, Rita Greene, Simon Judes, Daniel Kart, David Kagan, Paul Kaiser, Raphael Kasper, Juan Maldacena, Katinka Matson, Maulik Parikh, Marcus Poessel, Michael Popowits y Ken Vineberg. También es una delicia trabajar con mi editor en Knopf, Marty Asher, y agradezco a Andrew Carlson su experta conducción del libro a través de las etapas finales de producción. Las maravillosas ilustraciones de Jason Severs mejoran la presentación, y le doy las gracias por su talento y su paciencia. También es un placer dar las gracias a mis agentes literarios, Katinka Matson y John Brockman.

Al elaborar mi aproximación al material que cubro en este libro me he beneficiado de muchísimas conversaciones con numerosos colegas. Además de los ya mencionados, me gustaría dar las gracias especialmente a Raphael Bousso, Robert Branderberger, Frederik Denef, Jacques Distler, Michael Douglas, Lam Hui, Lawrence Krauss, Janna Lewin, Andrei Linde, Seth Lloyd, Barry Loewer, Saul Perlmutter, Jürgen Schmidhuber, Steve Shenker, Paul Steinhardt, Andrew Strominger, Leonard Susskind, Max Tegmark, Henry Tye, Cumrun Vafa, David Wallace, Erick Weinberg y Shing-Tung Yau.

Empecé a escribir mi primer libro de divulgación científica, *El universo elegante*, en el verano de 1996. En los quince años transcurridos he disfrutado de un inesperado y fructífero intercambio entre el foco de mi investigación técnica y los temas que cubren mi libro. Doy las gracias a mis estudiantes y colegas en la Universidad Columbia por crear un vibrante entorno investigador, al Departamento de Energía por financiar mi investigación científica, y también al finado Pentti Kouri por su generoso apoyo a mi centro de investigación en Columbia, el Instituto de Física de Cuerdas, Cosmología y Astropartículas.

Para terminar, doy las gracias a Tracy, Alec y Sophia por hacer de éste el mejor de los universos posibles.

1

Los límites de la realidad

Sobre mundos paralelos

Si, cuando era niño, sólo hubiera tenido un espejo en mi habitación, quizá mis fantasías infantiles habrían sido muy diferentes. Pero tenía dos. Y cuando cada mañana abría el armario para sacar mi ropa, el espejo que había en la puerta quedaba frente al de la pared, y cualquier cosa que hubiera entre ellos se repetía en una cadena de reflejos interminable. Era hipnotizador. Yo me extasiaba viendo cómo una imagen tras otra poblaban los planos de cristal paralelos y se extendían hasta donde la vista podía alcanzar. Todos los reflejos parecían moverse al unísono, aunque yo sabía que eso era una simple limitación de la percepción humana, pues para entonces ya había aprendido que la velocidad de la luz era finita. Lo que en mi imaginación estaba observando eran los viajes de ida y vuelta de la luz. Veía mi cogote, el movimiento de mi brazo silenciosamente reflejado entre los espejos, y cada imagen repetida empujando a la siguiente. A veces imaginaba a un yo rebelde en la hilera que se negaba a estar en su lugar, rompiendo la progresión y creando una nueva realidad que se transmitía a los que le seguían. A veces, durante los períodos de descanso en la escuela, pensaba que la luz que yo había emitido esa mañana todavía estaría rebotando incesantemente entre los espejos, y me sumaba como uno más de mis yos reflejados, entrando en un mundo paralelo imaginario construido de luz y dirigido por la fantasía.

Por supuesto, las imágenes reflejadas no tienen una mente propia. Pero estas fantasías juveniles, con sus realidades paralelas imaginadas, resuenan como un tema cada vez más importante en la ciencia moderna: la posibilidad de mundos más allá del que conocemos. Este libro es una exploración de tales posibilidades, un viaje a través de la ciencia de los universos paralelos.

Universo y universos

Hubo un tiempo en que «universo» significaba «todo lo que hay». Todas las cosas. La idea de más de un universo, más de un todo, parecía una contradicción en los términos. Pero una serie de desarrollos teóricos ha matizado poco a poco la interpretación de «universo». El significado del término depende ahora del contexto. A veces «universo» sigue significando todo absolutamente. Otras veces se refiere sólo a aquellas partes del todo a las que alguien como usted o como yo podría tener acceso en principio. A veces se aplica a dominios separados, dominios que en parte o completamente, temporal o permanentemente, nos son inaccesibles; en este sentido, el término relega nuestro universo a ser un miembro de un conjunto grande, quizá infinitamente grande.

Reducida su hegemonía, «universo» ha dado paso a otros términos que recogen el lienzo más amplio en el que puede pintarse la totalidad de la realidad. *Mundos paralelos* o *universos paralelos* o *universos múltiples* o *universos alternativos* o el *metaverso*, *megaverso* o *multiverso* —todos éstos son términos sinónimos y todos están entre los utilizados para abarcar no sólo nuestro universo, sino un espectro de otros universos que quizá estén ahí—.

Pero usted advertirá que los términos son algo vagos. ¿Qué es exactamente lo que constituye un mundo o un universo? ¿Qué criterios distinguen dominios que son partes distintas de un único universo de aquellos dominios clasificados como universos por sí mismos? Quizá algún día nuestra comprensión de los universos múltiples esté suficientemente madura para que tengamos respuestas precisas a estas preguntas. Por el momento evitaremos luchar con definiciones abstractas y adoptaremos el famoso enfoque que aplicaba el juez Potter Stewart para definir la pornografía. Mientras la Corte Suprema de Estados Unidos se esforzaba por establecer una definición, Stewart declaró: «Lo sé cuando la veo».

A fin de cuentas, llamar universo paralelo a un dominio u otro es simplemente una cuestión de lenguaje. Lo que importa, lo que está en el corazón del tema, es si existen dominios que desafían la convención al sugerir que lo que hasta ahora pensábamos que es el universo es tan sólo un componente de una realidad mucho mayor, quizá mucho más extraña y, en su mayor parte, oculta.

Variedades de universos paralelos

Un hecho sorprendente (que es, en parte, lo que me impulsó a escribir este libro) es que muchos de los desarrollos importantes en la física teórica fundamental —física relativista, física cuántica, física cosmológica, física unificada, física computacional— nos han llevado a considerar una u otra variedad de universos paralelos. De hecho, los capítulos que siguen trazan un arco narrativo a través de nueve variaciones sobre el tema del multiverso. Cada una concibe nuestro universo como parte de

un todo inesperadamente más grande, pero la complexión de este todo y la naturaleza de los universos miembros difieren marcadamente de una a otra. En algunas, los universos paralelos están separados de nosotros por enormes extensiones de espacio o de tiempo; en otras, se ciernen a pocos milímetros; y en otras, la propia noción de su localización se muestra pueblerina, carente de significado. Una gama de posibilidades similar se manifiesta en las leyes que gobiernan los universos paralelos. En algunos, las leyes son las mismas que en el nuestro; en otros parecen diferentes, pero tienen una herencia compartida; y en otros, las leyes tienen una forma y una estructura diferente de cualquier cosa que hayamos encontrado nunca. Es una cura de humildad, y también excitante, imaginar cuán extensa puede ser la realidad.

Algunas de las primeras incursiones científicas en los mundos paralelos fueron iniciadas en los años cincuenta del siglo pasado por investigadores intrigados por algunos aspectos de la mecánica cuántica, una teoría desarrollada para explicar fenómenos que tienen lugar en el dominio microscópico de átomos y partículas subatómicas. La mecánica cuántica rompió el molde del marco anterior, la mecánica clásica, al establecer que las predicciones de la ciencia son necesariamente probabilistas. Podemos predecir las probabilidades de obtener un resultado, podemos predecir las probabilidades de otro, pero en general no podemos predecir lo que sucederá realmente. Esta bien conocida desviación respecto a cientos de años de pensamiento científico ya es bastante sorprendente. Pero hay un aspecto más controvertido de la teoría cuántica que recibe menos atención. Tras décadas de estudio riguroso de la mecánica cuántica, y tras haber acumulado una gran riqueza de datos que confirman sus predicciones probabilísticas, nadie ha sido capaz de explicar por qué sólo uno de los muchos resultados posibles en una situación dada sucede realmente. Cuando hacemos ex-

perimentos, cuando examinamos el mundo, todos estamos de acuerdo en que encontramos una única realidad definida. Pero más de un siglo después del inicio de la revolución cuántica, no hay consenso entre los físicos respecto a cómo se puede hacer compatible este hecho con la expresión matemática de la teoría.

Durante años, esta laguna sustancial en el conocimiento ha inspirado muchas propuestas creativas, pero la más sorprendente fue una de las primeras. Quizá, decía esta temprana sugerencia, la idea familiar de que cualquier experimento dado tiene un resultado, y sólo uno, es falsa. Las matemáticas que subyacen a la mecánica cuántica —o al menos, una perspectiva sobre las matemáticas— sugiere que suceden *todos* los resultados posibles, y cada uno de ellos habita en su propio universo separado. Si un cálculo cuántico predice que una partícula podría estar aquí, o podría estar allí, entonces en un universo está aquí y en otro universo está allí. Y en cada uno de estos universos hay una copia de usted siendo testigo de uno o del otro resultado, una copia que piensa —incorrectamente— que su realidad es la única realidad. Cuando usted se da cuenta de que la mecánica cuántica subyace en todos los procesos físicos, desde la fusión de átomos en el Sol hasta los disparos neuronales que constituyen la materia del pensamiento, se hacen evidentes las trascendentales implicaciones de la propuesta. Dice que no hay caminos que no son recorridos. Pero cada uno de estos caminos —cada realidad— está oculto para todos los demás.

Esta sugerente aproximación de los *muchos mundos* a la mecánica cuántica ha atraído mucho interés en décadas recientes. Pero las investigaciones han mostrado que es un marco sutil y espinoso (como discutiremos en el capítulo 8); de modo que, incluso hoy, tras más de medio siglo de examen exhaustivo, la propuesta sigue siendo controvertida. Algunos usuarios de la mecánica cuántica afirman que ya se ha probado correcta,

mientras que otros afirman con la misma convicción que los cimientos matemáticos no se sostienen.

A pesar de esta incertidumbre científica, esta temprana versión de los universos paralelos resonaba con los temas de países remotos o historias alternativas que estaban siendo explorados en la literatura, la televisión y el cine, incursiones creativas que continúan hoy. (Mis favoritas desde mi infancia incluyen *El mago de Oz, ¡Qué bello es vivir!,* el episodio de *Star Trek* «La ciudad al borde de la eternidad», el cuento de Borges «El jardín de los senderos que se bifurcan», y, más recientemente, *Dos vidas en un instante* y *Corre, Lola, corre*). En conjunto, estas y muchas otras obras de la cultura popular han ayudado a integrar el concepto de realidades paralelas en la mentalidad de nuestro tiempo y son responsables de haber alimentado mucha fascinación pública por el tema. Pero la mecánica cuántica es sólo una de las muchas maneras en que una concepción de los universos paralelos emerge de la física moderna. De hecho, no será la primera que voy a discutir.

En el capítulo 2 empezaré por una ruta diferente hacia los universos paralelos, quizá la más simple. Veremos que si el espacio se extiende indefinidamente —una proposición que es compatible con todas las observaciones y que es parte del modelo cosmológico preferido por muchos físicos y astrónomos —, entonces debe de haber dominios allá fuera (probablemente *muy* allá) donde copias de usted y de mí y de todo lo demás disfrutan de versiones alternativas de la realidad que experimentamos aquí. El capítulo 3 profundizará más en la cosmología: la teoría inflacionaria, una aproximación que postula un enorme estallido de expansión espacial superrápida en los primeros momentos del universo, genera su propia versión de mundos paralelos. Si la inflación es correcta, como sugieren las más refinadas observaciones astronómicas, el estallido que creó nuestra región de espacio quizá no haya sido único. En su lu-

gar, podría darse el caso de que, precisamente ahora, la expansión inflacionaria en dominios lejanos esté generando un universo tras otro, y quizá continúe haciéndolo por toda la eternidad. Y lo que es más, cada uno de estos universos en rápido aumento tiene su propia extensión espacial infinita, y con ello contiene un número infinito de los mundos paralelos que hemos encontrado en el capítulo 2.

En el capítulo 4 nuestra andadura se dirige hacia la teoría de cuerdas. Tras un breve repaso de las ideas básicas, presentaré el estado actual de esta aproximación que trata de unificar todas las leyes de la naturaleza. Con esta visión general, en los capítulos 5 y 6 exploraremos los desarrollos recientes en teoría de cuerdas que sugieren tres nuevos tipos de universos paralelos. Uno es el escenario *mundobrana* de la teoría de cuerdas, que propone que nuestro universo es una de las potencialmente numerosas «láminas» que flotan en un espacio de más altas dimensiones, parecida a una rebanada de pan dentro de una barra cósmica más grande.[1] Si tenemos suerte, es una aproximación que puede dejar una señal inequívoca en el Gran Colisionador de Hadrones en Ginebra, Suiza, en un futuro no muy lejano. Una segunda variedad surge de mundobranas que chocan entre sí, y al hacerlo destruyen todo lo que contienen e inician un nuevo y violento comienzo de tipo big bang en cada uno de ellos. Como si dos manos gigantes estuvieran chocando las palmas, esto podría suceder una y otra vez: las branas podrían colisionar, rebotar y separarse, atraerse mutuamente por gravitación y volver a colisionar, un proceso cíclico que genera universos que son paralelos no en el espacio sino en el tiempo. El tercer escenario es el «paisaje» de la teoría de cuerdas, basado en el enorme número de formas y tamaños posibles para las dimensiones espaciales extra que requiere la teoría. Veremos que cuando se combina con el multiverso inflacionario, el paisaje de

cuerdas sugiere una inmensa colección de universos en la que se realiza cada forma posible para las dimensiones extra.

En el capítulo 6 mostraremos cómo estas consideraciones iluminan uno de los más sorprendentes resultados observacionales del último siglo: el espacio parece estar lleno de una energía uniforme difusa, que bien podría ser una versión de la famosa y debatida constante cosmológica de Einstein. Esta observación ha inspirado buena parte de la reciente investigación en universos paralelos, y es responsable de uno de los más acalorados debates que han tenido lugar en décadas sobre la naturaleza de las explicaciones científicas aceptables. El capítulo 7 amplía este tema preguntando, con más generalidad, si la consideración de universos más allá del nuestro puede ser entendida correctamente como una rama de la ciencia. ¿Podemos poner a prueba estas ideas? Si las invocamos para resolver problemas excepcionales, ¿hemos hecho avances, o simplemente hemos barrido los problemas bajo una alfombra cósmica convenientemente inaccesible? Yo he tratado de exponer las ideas esenciales de las perspectivas en conflicto, aunque dejo clara mi propia opinión según la cual, en ciertas condiciones específicas, los universos paralelos caen inequívocamente dentro del ámbito de la ciencia.

La mecánica cuántica, con su versión muchos mundos de los universos paralelos, es el tema del capítulo 8. Le recordaré brevemente las características esenciales de la mecánica cuántica para centrarme luego en su problema más formidable: cómo extraer resultados definidos de una teoría cuyo paradigma básico admite que realidades mutuamente contradictorias coexistan en una bruma probabilista amorfa pero matemáticamente precisa. Le llevaré con cuidado a través del razonamiento que, en búsqueda de una respuesta, propone anclar la realidad cuántica en su propia profusión de mundos paralelos.

El capítulo 9 nos lleva aún más lejos en la realidad cuántica, lo que conduce a lo que yo considero la versión más extraña de todas las propuestas de universos paralelos. Es una propuesta que surgió poco a poco durante treinta años de estudios teóricos sobre las propiedades cuánticas de los agujeros negros. El trabajo culminó en la pasada década con un sorprendente resultado de la teoría de cuerdas, y sugiere, curiosamente, que todo lo que experimentamos no es otra cosa que una proyección holográfica de procesos que tienen lugar en alguna superficie lejana que nos rodea. Usted puede pellizcarse, y lo que sienta será real, pero refleja un proceso paralelo que tiene lugar en una realidad distante y diferente.

Finalmente, en el capítulo 10 será protagonista la todavía más fantástica posibilidad de universos artificiales. La cuestión de si las leyes de la física nos dan la capacidad de crear nuevos universos será nuestro primer punto de interés. Luego nos dirigiremos a universos creados no con *hardware* sino con *software* —universos que podrían simularse en un computador superavanzado—, e investigaremos si podemos confiar en que no estamos viviendo ahora en la simulación de alguien o de algo. Esto nos llevará a la propuesta más libre de universo paralelo, que tiene su origen en la comunidad filosófica: que todo universo posible se realiza en algún lugar en lo que es ciertamente el más grande de todos los multiversos. La discusión se desarrolla de forma natural como una indagación sobre el papel que tienen las matemáticas en desvelar los misterios de la ciencia y, en definitiva, nuestra capacidad, o falta de ella, para obtener un conocimiento cada vez más profundo de la realidad.

El orden cósmico

El tema de los universos paralelos es muy especulativo. Ningún experimento u observación ha establecido que alguna versión de la idea tenga su realización en la naturaleza. Por ello, mi objetivo al escribir este libro no es convencerle de que somos parte de un multiverso. Yo no estoy convencido —y, hablando en general, nadie debería estarlo— de algo que no esté apoyado por los datos puros y duros. Dicho esto, encuentro a la vez curioso e irresistible el hecho de que numerosos desarrollos en física, si se llevan suficientemente lejos, chocan con alguna variación sobre el tema del universo paralelo. No es que los físicos estén listos, con las redes del multiverso en sus manos, esperando atrapar cualquier teoría circunstancial que pudiera introducirse, por difícil que pueda ser, en un paradigma de universos paralelos. Más bien, todas las propuestas de universos paralelos que tomaremos en serio surgen espontáneamente de las matemáticas de teorías desarrolladas para explicar datos y observaciones convencionales.

Así pues, mi intención es exponer de forma clara y concisa los pasos intelectuales y la cadena de ideas teóricas que han llevado a los físicos, desde diversas perspectivas, a considerar la posibilidad de que el nuestro sea uno de muchos universos. Quiero darle una idea de cómo las modernas investigaciones científicas —no fantasías desbocadas como las elucubraciones catóptricas de mi infancia— sugieren de forma natural esta asombrosa posibilidad. Quiero mostrarle cómo ciertas observaciones, por lo demás controvertidas, pueden hacerse fundamentalmente comprensibles dentro de uno u otro marco de universos paralelos; al mismo tiempo, describiré las cuestiones críticas no resueltas que han impedido, de momento, que este enfoque explicatorio esté plenamente realizado. Mi objetivo es que cuando usted deje este libro, su idea de lo que podría existir —su perspectiva de cómo las fronteras de la realidad pue-

den un día ser retrazadas por desarrollos científicos ahora en curso— será más rica y vívida.

Algunas personas retroceden ante la idea de mundos paralelos; tal como ellos lo ven, si somos parte de un multiverso, nuestro lugar e importancia en el cosmos son marginales. Mi postura es otra. Yo no creo que nuestra abundancia relativa sea un mérito para medir nuestra importancia. Más bien, lo que resulta gratificante en ser humano, lo que es excitante en ser parte de la empresa científica, es nuestra capacidad para utilizar el pensamiento analítico para salvar grandes distancias, viajando al espacio exterior e interior y, si alguna de las ideas que encontraremos en este libro se muestran correctas, quizá incluso más allá de nuestro universo. Para mí, es la profundidad de nuestro conocimiento, adquirido desde nuestra posición solitaria en el oscuro silencio de un cosmos frío y hostil, la que reverbera a lo largo de la extensión de la realidad y marca nuestra llegada.

2

Dobles sin fin

El multiverso mosaico

Si usted emprendiera un viaje por el cosmos, que le llevara cada vez más lejos, ¿encontraría que el espacio se prolonga indefinidamente o encontraría que termina de forma abrupta? ¿O tal vez acabaría volviendo al punto de partida, como sir Francis Drake cuando dio la vuelta a la Tierra? Ambas posibilidades —un cosmos que se extiende indefinidamente, o un cosmos que es enorme pero finito— son compatibles con todas nuestras observaciones, y han sido intensamente estudiadas durante las últimas décadas por destacados investigadores. Pero pese a todo ese examen detallado, una sorprendente conclusión, que se deriva de la posible infinitud del universo, ha recibido una atención relativamente escasa.

En los lejanos confines de un cosmos infinito hay una galaxia que se parece a la Vía Láctea, con un sistema solar que es un duplicado exacto del nuestro, con un planeta que es idéntico a la Tierra, con un hogar que es indistinguible del suyo, habitado por alguien que es su vivo retrato, que precisamente ahora está leyendo este mismo libro e imaginándole a usted, en una galaxia lejana, acabando de leer esta frase. Y no hay sólo una copia como ésta. En un universo infinito hay infinitas copias. En algunas, su doble está leyendo ahora esta frase, a la par que usted. En otras, se la ha saltado, o siente que necesita tomar algo y ha dejado el libro. Y en otras…, bien, no tiene un carácter

muy agradable y es alguien al que usted no le gustaría encontrar en un callejón oscuro.

Y no lo encontrará. Estas copias habitarían dominios tan lejanos que la luz que viaja desde el big bang no habría tenido tiempo de atravesar la extensión de espacio que nos separa. Pero incluso sin capacidad de observar estos dominios, veremos que hay principios físicos básicos que establecen que si el cosmos es infinitamente grande, es hogar de infinitos mundos paralelos —algunos idénticos al nuestro, otros diferentes del nuestro, y muchos que no guardan ningún parecido en absoluto con nuestro mundo—.

En ruta a estos mundos paralelos, debemos desarrollar primero el marco esencial de la cosmología, el estudio científico del origen y la evolución del cosmos como un todo.

Vayamos a ello.

El padre del big bang

«Sus matemáticas son correctas, pero su física es abominable». Ésta fue la reacción de Albert Einstein cuando el belga Georges Lemaître, en plena Conferencia Solvay de Física de 1927, le informó de que las ecuaciones de la relatividad general, que Einstein había publicado hacía más de una década, implicaban una espectacular reescritura de la historia de la creación. Según los cálculos de Lemaître, el universo empezó como una mota minúscula de densidad increíble, un «átomo primordial» como lo llegaría a llamar, que creció durante la inmensidad del tiempo para convertirse en el universo observable.

Lemaître era una figura inusual entre las docenas de reputados físicos, además de Einstein, que habían acudido al hotel Metropole de Bruselas para una semana de intensos debates sobre la teoría cuántica. En 1923 no sólo había completado su trabajo de doctorado, sino que también había acabado sus estudios en el seminario de Saint-Rombaut y había sido ordenado sacerdote jesuita. Durante un descanso en la conferencia, Lemaître, con su alzacuello, se acercó al hombre cuyas ecuaciones, creía él, eran la base de una nueva teoría científica del origen cósmico. Einstein conocía la teoría de Lemaître, pues había leído su artículo sobre el tema unos meses antes, y no podía encontrar ningún fallo en sus manipulaciones de las ecuaciones de la relatividad general. De hecho, no era ésta la primera vez que alguien le había presentado a Einstein este resultado. En 1921, el matemático ruso Alexander Friedmann había dado con una variedad de soluciones de las ecuaciones de Einstein en las que el espacio se dilataría y haría que el universo se expandiera. Einstein se resistía a aceptar estas soluciones, e inicialmente sugirió que los cálculos de Friedmann contenían errores. En esto Einstein estaba equivocado; más adelante se retractó. Pero Einstein se negaba a ser un peón de las matemáticas. Él rechazaba las ecuaciones en favor de su intuición acerca de cómo *debería* ser el cosmos, su creencia profundamente arraigada en que el universo era eterno y, en la mayor de las escalas, fijo e invariable. El universo, reprendió Einstein a Lemaître, no está expandiéndose ahora y nunca lo estuvo.

Seis años después, en una sala de seminarios en el Observatorio del Monte Wilson en California, Einstein escuchaba atentamente mientras Lemaître exponía una versión más detallada de su historia según la cual el universo comenzó en un destello primordial y las galaxias eran ascuas flotantes en un mar de espacio que se dilataba. Cuando concluyó el seminario, Einstein se puso en pie y declaró que la teoría de Lemaître era «la más

bella y satisfactoria explicación de la creación que he oído nunca».[2] El físico más famoso del mundo había sido persuadido para cambiar de opinión sobre uno de los misterios más desafiantes del mundo. Aunque todavía básicamente desconocido para el gran público, Lemaître llegaría a ser conocido entre los científicos como el padre del big bang.

Relatividad general

Las teorías cosmológicas desarrolladas por Friedmann y Lemaître se basaban en un manuscrito que Einstein envió a la revista alemana *Annalen der Physik* el 25 de noviembre de 1915. El artículo era la culminación de una odisea matemática de casi diez años, y los resultados que presentaba —la teoría de la relatividad general— se iban a revelar como el más completo y trascendental de los logros científicos de Einstein. Con la relatividad general, Einstein invocaba un elegante lenguaje científico para reformular por completo la comprensión de la gravedad. Si usted ya tiene un buen conocimiento de los aspectos básicos y las implicaciones cosmológicas de la teoría, siéntase libre para saltarse las tres secciones siguientes. Pero si quiere un breve recordatorio de los puntos esenciales, siga conmigo.

Einstein empezó a trabajar en la relatividad general hacia 1907, una época en que la mayoría de los científicos pensaba que la gravedad había sido explicada hacía tiempo por la obra de Isaac Newton. Como se les enseña rutinariamente a todos los escolares del mundo, a finales del siglo XVII Newton dio con su denominada ley de la gravitación universal, que proporcionaba la primera descripción matemática de la más familiar de las fuerzas de la naturaleza. Su ley es tan precisa que los in-

genieros de la NASA aún la utilizan para calcular las trayectorias de las naves espaciales, y los astrónomos aún la utilizan para predecir el movimiento de cometas, estrellas e incluso galaxias enteras.[3]

Esta eficacia demostrable hace todavía más notable el hecho de que, en los primeros años del siglo XX, Einstein advirtiera que la ley de gravitación de Newton era profundamente defectuosa. Una pregunta aparentemente simple lo ponía de manifiesto de forma muy clara: ¿cómo, preguntaba Einstein, actúa la gravedad? ¿Cómo, por ejemplo, extiende el Sol su influencia a lo largo de ciento cincuenta millones de kilómetros de espacio vacío y afecta al movimiento de la Tierra? No hay ninguna cuerda que los ligue, ninguna cadena que tire de la Tierra cuando se mueve…, así que ¿cómo ejerce su influencia la gravedad?

En sus *Principia*, publicados en 1687, Newton reconocía la importancia de esta pregunta pero admitía que su propia ley guardaba un perturbador silencio sobre la respuesta. Newton estaba seguro de que tenía que haber algo que transmitía la gravedad de un lugar a otro, pero fue incapaz de identificar qué podría ser. En los *Principia* dejó la cuestión graciosamente «a la consideración del lector», y durante más de doscientos años quienes leyeron este reto simplemente lo pasaron por alto. Eso es algo que Einstein no podía hacer.

Durante casi toda una década Einstein se consumió tratando de encontrar el mecanismo subyacente a la gravedad; en 1915 propuso una respuesta. Aunque estaba basada en matemáticas sofisticadas y requería saltos conceptuales sin precedentes en la historia de la física, la propuesta de Einstein tenía el mismo aire de simplicidad que la pregunta que pretendía abordar. Pero ¿qué proceso hace que la gravedad ejerza su influencia a través del espacio vacío? La vaciedad del espacio dejaba aparentemente a todos con las manos vacías. Pero, en realidad, hay algo en

el espacio vacío: *espacio*. Esto llevó a Einstein a sugerir que el propio espacio podría ser el medio de la gravedad.

La idea es la siguiente. Imaginemos una canica que rueda por una gran mesa metálica. Puesto que la superficie de la mesa es plana, la canica rodará en línea recta. Pero si posteriormente la mesa es presa del fuego, que hace que se deforme y se hinche, una canica que rueda seguirá una trayectoria diferente porque estará guiada por la superficie retorcida y sinuosa de la mesa. Einstein afirmaba que una idea similar se aplica al tejido del espacio. El espacio completamente vacío es muy parecido a la mesa plana que permite que los objetos rueden sin trabas a lo largo de líneas rectas. Pero la presencia de cuerpos masivos afecta a la forma del espacio, igual que el calor afecta a la forma de la superficie de la mesa. El Sol, por ejemplo, crea un abombamiento en su vecindad, muy similar a la formación de una burbuja en el metal de la mesa caliente. Y así como la superficie curvada de la mesa hace que la canica siga una trayectoria curva, también la forma curvada del espacio alrededor del Sol guía a la Tierra y a otros planetas en su órbita.

Esta breve descripción pasa por alto algunos detalles importantes. No es sólo el espacio el que se curva, sino también el tiempo (esto es lo que se denomina curvatura espacio-temporal); la propia gravedad de la Tierra facilita la influencia de la mesa, pues es la que mantiene la canica sobre su superficie (Einstein afirmaba que las arrugas en el espacio y el tiempo no necesitan un facilitador, puesto que ellas *son* gravedad); el espacio es tridimensional, de modo que cuando se deforma lo hace alrededor de un objeto y no sólo «por debajo», como sugiere la analogía de la mesa. En cualquier caso, la imagen de una mesa retorcida capta la esencia de la propuesta de Einstein. Antes de Einstein, la gravedad era una fuerza misteriosa que, de alguna manera, un cuerpo ejercía sobre otro a través del espacio. Después de Einstein, la gravedad era reconocida como una distor-

sión del entorno causada por un objeto y que guiaba el movimiento de otros objetos. Según estas ideas, usted está ahora anclado al suelo porque su cuerpo está tratando de deslizarse por una hendidura en el espacio (en realidad, espacio-tiempo) provocada por la Tierra.[4]

Einstein dedicó años a desarrollar esta idea en un marco matemático riguroso, y las resultantes *ecuaciones de campo de Einstein*, el corazón de su teoría de la relatividad general, nos dice precisamente cómo se curvarán el espacio y el tiempo como resultado de la presencia de una cantidad dada de materia (más exactamente, materia y energía; de acuerdo con la $E = mc^2$ de Einstein, en donde E es la energía y m la masa, las dos son intercambiables).[5] Con la misma precisión, la teoría muestra cómo dicha curvatura del espacio-tiempo afectará al movimiento de cualquier cosa —estrella, planeta, cometa, la propia luz— que se mueva a través del mismo; esto permite que los físicos hagan predicciones detalladas del movimiento cósmico.

Enseguida llegaron pruebas en apoyo de la relatividad general. Hacía tiempo que los astrónomos sabían que el movimiento orbital de Mercurio en torno al Sol se desviaba ligeramente de lo que predecían las matemáticas de Newton. En 1915, Einstein utilizó sus nuevas ecuaciones para recalcular la trayectoria de Mercurio y fue capaz de explicar la discrepancia, un logro que posteriormente describió a su colega Adrian Fokker como algo tan excitante que durante algunas horas le produjo taquicardia. Luego, en 1919, las observaciones astronómicas emprendidas por Arthur Eddington y sus colaboradores demostraron que la luz procedente de estrellas lejanas que pasa cerca del Sol en su camino a la Tierra sigue una trayectoria curva, precisamente la que predecía la relatividad general.[6] Con esta confirmación —y los titulares de portada del *New York Times* que afirmaban «LUCES CURVAS EN LOS CIELOS, LOS HOMBRES DE CIENCIA MÁS O MENOS EXPECTANTES»—, Einstein fue cata-

pultado a la fama internacional como el último genio científico mundial, el heredero de Isaac Newton.

Pero los tests más impresionantes de la relatividad general estaban todavía por llegar. En los años setenta, experimentos que utilizaban relojes basados en máseres de hidrógeno (los máseres son similares a los láseres, pero operan en la región de microondas del espectro) confirmaron la predicción de la relatividad general de la curvatura espacio-temporal en la vecindad de la Tierra con una precisión de una parte en quince mil. En 2003, la sonda espacial Cassini-Huygens fue utilizada para hacer estudios detallados de las trayectorias de las ondas de radio que pasaban cerca del Sol; los datos recogidos apoyaban la imagen de la curvatura espacio-temporal predicha por la relatividad general con una precisión de una parte en cincuenta mil. Y ahora, gracias a una teoría que ha quedado plenamente establecida, muchos de nosotros caminamos con la relatividad general en la palma de la mano. El sistema de posicionamiento global al que usted accede sin problemas desde su teléfono comunica con satélites cuyos dispositivos de cronometraje interno tienen en cuenta rutinariamente la curvatura espacio-temporal que experimentan en su órbita sobre la Tierra. Si los satélites no lo hicieran, las lecturas de la posición que generan se harían inexactas rápidamente. Lo que en 1916 era un conjunto de ecuaciones matemáticas abstractas que Einstein presentaba como una nueva descripción del espacio, el tiempo y la gravedad, es ahora rutinariamente utilizado por aparatos que caben en nuestros bolsillos.

El universo y la tetera

Einstein insufló vida en el espacio-tiempo. Desafió miles de años de intuición, basada en la experiencia cotidiana, que trataba el espacio y el tiempo como un telón de fondo invariable. ¿Quién habría imaginado que el espacio-tiempo puede retorcerse y flexionarse, y que así proporciona el coreógrafo invisible del movimiento en el cosmos? Ésa es la danza revolucionaria que concibió Einstein y que las observaciones han confirmado. Y pese a todo, Einstein pronto sucumbió bajo el peso de prejuicios arcaicos pero infundados.

Durante el año que siguió a la publicación de la teoría de la relatividad general, Einstein la aplicó a la mayor de las escalas: el cosmos entero. Usted quizá piensa que ésta es una tarea inabarcable, pero el arte de la física teórica está en simplificar lo tremendamente complejo para hacer tratable el análisis teórico aun manteniendo los aspectos físicos esenciales. Es el arte de saber lo que se puede ignorar. Mediante el denominado *principio cosmológico*, Einstein estableció un marco simplificador que dio inicio al arte y la ciencia de la cosmología teórica.

El principio cosmológico afirma que si se examina el universo en la escala más grande, parecerá uniforme. Piense en el té que se toma usted por la mañana. En escalas microscópicas hay mucha inhomogeneidad: algunas moléculas de H_2O aquí, un espacio vacío, algunas moléculas de polifenol y tanino más allá, más espacio vacío, y así sucesivamente. Pero en escalas macroscópicas, las accesibles a simple vista, el té es un líquido de un tono castaño uniforme. Einstein creía que el universo era como la taza de té. Las variaciones que nosotros observamos —la Tierra está aquí, hay algún espacio vacío, luego está la Luna, luego más espacio vacío, seguido de Venus, Mercurio, regiones de espacio vacío, y luego el Sol— son inhomogeneidades a pequeña escala. Él sugirió que en escalas cosmológicas estas variaciones podían ignorarse porque, como sucede con el té, se promediaban para dar algo uniforme.

En los días de Einstein las pruebas en apoyo del principio cosmológico eran débiles cuando menos (incluso todavía se estaba discutiendo si existían otras galaxias), pero él se guiaba por una fuerte sensación de que no había ningún lugar especial en el cosmos. Pensaba que, en promedio, cualquier región del universo debería ser igual que cualquier otra, y por lo tanto debería tener propiedades físicas generales esencialmente idénticas. En los años transcurridos desde entonces, las observaciones astronómicas han proporcionado un apoyo sustancial para el principio cosmológico, pero sólo si se examina el espacio en escalas de al menos cien millones de años luz (que es unas mil veces la longitud de un extremo a otro de la Vía Láctea). Si usted toma una caja de un centenar de años luz de lado y la coloca *aquí*, toma otra caja igual y la coloca *allí* (digamos a mil millones de años luz de *aquí*), y luego mide las propiedades generales medias dentro de cada caja —número promedio de galaxias, cantidad media de materia, temperatura media y demás— encontrará difícil distinguir una de otra. En resumen, una vez que se ha visto una región de cien millones de años luz del cosmos, se han visto prácticamente todas.

Esta uniformidad resulta crucial al utilizar las ecuaciones de la relatividad general para estudiar el universo entero. Para ver por qué, piense en una bella playa, suave y uniforme, e imagine que yo le he pedido que describa sus propiedades a pequeña escala, es decir, las propiedades de cada grano de arena. Usted está desbordado: la tarea es demasiado grande. Pero si yo le pido que describa sólo las características globales de la playa (tales como la cantidad media de arena por metro cúbico, la reflectividad media de la superficie de la playa por metro cuadrado y cosas así), la tarea se hace factible. Y lo que la hace factible es la uniformidad de la playa. No hay más que medir la cantidad media de arena, la temperatura y la reflectividad aquí y ya está hecho. Hacer las mismas medidas en otro lugar daría respuestas

esencialmente idénticas. Lo mismo sucede con un universo uniforme. Sería una tarea imposible describir cada planeta, cada estrella y cada galaxia. Pero describir las propiedades medias de un cosmos uniforme es muchísimo más fácil; y, con la llegada de la relatividad general, realizable.

Así es como se hace. El contenido general de un enorme volumen de espacio está caracterizado por la cantidad de «materia» que contiene; más exactamente, por la densidad de materia, o, más exactamente aún, la densidad de materia y de energía que contiene el volumen. Las ecuaciones de la relatividad general describen cómo cambia esta energía con el tiempo. Pero sin invocar el principio cosmológico, analizar estas ecuaciones es desesperadamente difícil. Son diez y, puesto que cada ecuación depende de forma intrincada de las otras, forman un duro nudo gordiano matemático. Por fortuna, Einstein encontró que cuando se aplican las ecuaciones a un universo uniforme, las matemáticas se simplifican; las diez ecuaciones se hacen redundantes y, de hecho, se reducen a una. El principio cosmológico corta el nudo gordiano al reducir a una única ecuación la complejidad matemática que supone el estudio de la materia y la energía dispersa a lo largo del cosmos (puede verlo en las notas).[7]

Lo que es menos afortunado, desde la perspectiva de Einstein, es que cuando él estudió esta ecuación encontró algo inesperado y, para él, inaceptable. La posición científica y filosófica dominante sostenía que en la escala más grande el universo no sólo era uniforme, sino que también era invariable. Igual que los rápidos movimientos moleculares en su taza de té se promedian para dar un líquido aparentemente estático, los movimientos astronómicos, tales como los de los planetas que orbitan alrededor del Sol y del Sol moviéndose alrededor de la galaxia, se promediarían para dar un cosmos global invariable. Einstein, que se adhería a esta perspectiva cósmica, encontró

para su disgusto que estaba en conflicto con la relatividad general. Las matemáticas mostraban que la densidad de materia y energía *no puede* ser constante a lo largo del tiempo. O aumenta o disminuye, pero no puede mantenerse invariable.

Aunque el análisis matemático que hay detrás de esta conclusión es sofisticado, la física subyacente es bastante simple. Imaginemos la trayectoria de una bola de béisbol cuando vuela desde la posición del bateador hacia la valla del campo. Al principio la bola sale despedida hacia arriba; luego se frena, alcanza la altura máxima y finalmente cae. La bola no se queda flotando perezosamente como un globo porque la gravedad, que es una fuerza atractiva, actúa en una dirección, tirando de la bola hacia la superficie de la Tierra. Una situación estática, como un empate en una competición de soga-tira, requiere fuerzas iguales y opuestas que se anulan. En el caso de un globo, la fuerza hacia arriba que contrarresta a la gravedad hacia abajo la proporciona el empuje del aire exterior, pues el globo está lleno de helio, que es más ligero que el aire; en el caso de la bola en medio del aire no hay empuje que contrarreste a la gravedad (la resistencia del aire actúa en contra de una bola en movimiento, pero no desempeña ningún papel en una situación estática), y por ello la bola no puede permanecer a una altura fija.

Einstein encontró que el universo es más parecido a la bola de béisbol que al globo. Puesto que no hay fuerza hacia fuera que cancele al tirón atractivo de la gravedad, la relatividad general muestra que el universo no puede ser estático. El tejido del universo se dilata o se contrae, pero su tamaño no puede permanecer fijo. Un volumen de espacio de cien millones de años luz de lado hoy no tendrá cien millones de años luz de lado mañana. O será más grande, y la densidad de materia en su interior disminuirá (al difundirse en un volumen mayor), o será más pequeño, y la densidad de materia aumentará (al estar más estrechamente empaquetado en un volumen menor).[8]

Einstein retrocedió. Según las matemáticas de la relatividad general, el universo en la escala más grande estaría cambiando, porque su propio sustrato —el propio espacio— estaría cambiando. El cosmos eterno y estático que Einstein esperaba que emergiera de sus ecuaciones simplemente no aparecía. Él había iniciado la ciencia de la cosmología, pero estaba profundamente disgustado por la situación a la que le habían llevado las matemáticas.

La declaración de renta de la gravedad

Se suele decir que Einstein rectificó —que volvió a sus cuadernos de notas y en un acto desesperado desfiguró las bellas ecuaciones de la relatividad general para hacerlas compatibles con un universo que no solo fuera uniforme sino también invariable—. Esto es verdad sólo en parte. Einstein modificó realmente sus ecuaciones para que apoyasen su convicción de un cosmos estático, pero el cambio era mínimo y totalmente razonable.

Para hacerse una idea de su jugada matemática, piense en cómo hace usted su declaración de renta. Intercaladas entre las líneas en las que usted escribe cifras hay otras que usted deja en blanco. Matemáticamente, una línea en blanco significa que la entrada es cero, pero psicológicamente tiene otra connotación. Significa que usted está ignorando la línea porque ha decidido que no es relevante para su situación financiera.

Si las matemáticas de la relatividad general estuvieran ordenadas como un impreso de declaración de renta, tendrían tres líneas. Una línea describiría la geometría del espacio-tiempo —sus alabeos y curvas—, la encarnación de la gravedad. Otra

describiría la distribución de materia a lo largo del espacio, la fuente de la gravedad: la causa de los alabeos y las curvas. Durante una década de intensa investigación, Einstein había elaborado la descripción matemática de estos dos aspectos y con ello había rellenado con gran cuidado estas dos líneas. Pero una exposición completa de la relatividad general requiere una tercera línea, una línea que está en pie de igualdad matemática con las otras dos pero cuyo significado físico es más sutil. Cuando la relatividad general ascendió el espacio y el tiempo a la categoría de participantes dinámicos en el despliegue del cosmos, éstos pasaron de proporcionar meramente un lenguaje para delinear dónde y cuándo tienen lugar las cosas a ser entidades físicas con sus propias propiedades intrínsecas. La tercera línea en la declaración de renta de la relatividad general cuantifica un aspecto intrínseco concreto del espacio-tiempo relevante para la gravedad: *la cantidad de energía cosida en el tejido del propio espacio*. Así como cada metro cúbico de agua contiene cierta cantidad de energía, resumida en la temperatura del agua, cada metro cúbico de espacio contiene cierta cantidad de energía, que se resume en el número en la tercera línea. En el artículo en que anunciaba la relatividad general, Einstein no consideraba esta línea. Matemáticamente esto es equivalente a darle un valor cero, aunque más parece que, como sucede con las líneas en blanco en sus declaraciones de renta, simplemente lo ignoró.

Cuando la relatividad general se mostró incompatible con un universo estático, Einstein volvió a ocuparse de las matemáticas, y esta vez consideró en detalle la tercera línea. Comprendió que no había ninguna justificación observacional o experimental para hacerla cero. También se dio cuenta de que contenía una física notable.

Él encontró que si en lugar de cero introducía un número positivo en la tercera línea, con lo que dotaba al tejido espacial de una energía positiva uniforme, cada región de espacio empu-

jaría a las demás (por razones que explicaré en el próximo capítulo), lo que produciría algo que la mayoría de los físicos había considerado imposible: *gravedad repulsiva.* Más aún, Einstein encontró que si ajustaba exactamente el valor del número que ponía en la tercera línea, la fuerza gravitatoria repulsiva producida a lo largo del cosmos neutralizaría exactamente a la habitual fuerza gravitatoria atractiva generada por la materia que llena el espacio, y daría lugar a un universo estático. Como el globo que flota sin ascender ni descender, el universo sería invariable.

Einstein llamó *miembro cosmológico* o *constante cosmológica* a la entrada en la tercera línea; con ella en su lugar, podía quedarse tranquilo. O podía quedarse más tranquilo. Si el universo tuviera una constante cosmológica del tamaño adecuado —es decir, si el espacio estuviera dotado de la cantidad correcta de energía intrínseca—, su teoría de la gravedad encajaría en la creencia dominante de que el universo en la escala más grande era invariable. Él no podía explicar por qué el espacio debería incorporar precisamente la cantidad correcta de energía para asegurar este balance, pero al menos había mostrado que la relatividad general, ampliada con una constante cosmológica del valor correcto, daba lugar al tipo de cosmos que él y otros habían esperado.[9]

El átomo primordial

Éste era el telón de fondo cuando Lemaître se acercó a Einstein en la Conferencia Solvay de 1927 en Bruselas para exponerle su resultado de que la relatividad general daba lugar a un nuevo paradigma cosmológico en el que el espacio se expandía. Tras haber luchado con las matemáticas para garantizar un uni-

verso estático, y haber desechado las afirmaciones similares de Friedmann, Einstein tenía poca paciencia para considerar de nuevo un cosmos en expansión. Así que criticó a Lemaître por seguir ciegamente las matemáticas y practicar la «física abominable» de aceptar una conclusión obviamente absurda.

Un rechazo por parte de una figura reverenciada no es pequeño revés, pero para Lemaître pasó pronto. En 1929, utilizando el que entonces era el mayor telescopio del mundo en el Observatorio del Monte Wilson, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble reunió pruebas convincentes de que todas las galaxias lejanas estaban alejándose de la Vía Láctea. Los fotones remotos que examinó Hubble habían viajado hasta la Tierra con un mensaje claro: el universo no es estático; se está expandiendo. La razón de Einstein para introducir la constante cosmológica era infundada. El modelo de big bang que describe un cosmos que empezó enormemente comprimido y se ha estado expandiendo desde entonces llegó a ser generalmente aclamado como la historia científica de la creación.[10]

Lemaître y Friedmann quedaron reivindicados. Friedmann recibió el crédito por ser el primero en explorar las soluciones de universo en expansión, y Lemaître por desarrollarlas de forma independiente en escenarios cosmológicos robustos. Sus trabajos fueron debidamente alabados como un triunfo de la intuición matemática acerca del funcionamiento del cosmos. Einstein, en cambio, se quedó lamentando no haberse interesado nunca en la tercera línea de la declaración de renta de la relatividad general. Si no hubiese seguido su injustificada convicción de que el universo es estático, no habría introducido la constante cosmológica y habría predicho la expansión cósmica más de una década antes de que fuera observada.

Sin embargo, la historia de la constante cosmológica no había acabado ni mucho menos.

El modelo de big bang de la cosmología incluye un detalle que resultará esencial. El modelo no ofrece otra cosa que un puñado de escenarios cosmológicos diferentes; todos ellos incluyen un universo en expansión, pero difieren con respecto a la forma general del espacio; y, en particular, difieren en la cuestión de si la extensión del espacio es finita o infinita. Puesto que la distinción finito *versus* infinito resultará vital al considerar mundos paralelos, expondré las posibilidades.

El principio cosmológico —la supuesta homogeneidad del cosmos— restringe la geometría del espacio porque, en su mayoría, las formas no son suficientemente uniformes para satisfacerlo: se abultan aquí, se aplanan allí o se retuercen más allá. Pero el principio cosmológico no implica una forma *única* para nuestras tres dimensiones del espacio; lo que hace, más bien, es reducir las posibilidades a un selecto conjunto de candidatos. Visualizarlos presenta un desafío incluso para los profesionales, pero la situación en *dos* dimensiones ofrece una precisa analogía matemática que es fácil de imaginar.

Con este fin, consideremos primero una bola de billar perfectamente redonda. Su superficie es bidimensional (lo que quiere decir que, como en la superficie de la Tierra, las posiciones en la superficie de la bola se pueden denotar con dos conjuntos de datos, tales como latitud y longitud), y es completamente uniforme en el sentido de que cada localización es similar a cualquier otra. Los matemáticos llaman a la superficie de la bola una *esfera bidimensional* y dicen que tiene una *curvatura positiva constante*. Hablando en términos muy generales, «positiva» significa que si usted viese su reflejo en un espejo esférico se vería hinchado, mientras que «constante» significa que la distor-

sión parece la misma en cualquier lugar de la esfera donde esté su reflejo.

A continuación, imaginemos el tablero de una mesa perfectamente lisa. Como sucede con la bola de billar, la superficie de la mesa es uniforme. O casi. Si usted fuera una hormiga que camina por la mesa, la vista desde cada punto sería la misma que desde cualquier otro, pero sólo si usted estuviera lejos del borde de la mesa. Incluso así, la uniformidad completa no es difícil de recuperar. Simplemente necesitamos imaginar una mesa sin bordes, y hay dos maneras de hacerlo. Pensemos en una mesa que se extiende indefinidamente a izquierda y derecha tanto como por delante y por detrás. Esto es inusual —es una superficie infinitamente grande— pero cumple el objetivo de no tener bordes, puesto que ahora no se puede caer por ningún lugar. Alternativamente, imaginemos una mesa que imita una pantalla de un video-juego primitivo, como el Pac Man o comecocos. Cuando el comecocos sale por el borde izquierdo, reaparece por el derecho; cuando cruza el borde inferior reaparece por arriba. Ninguna mesa ordinaria tiene esta propiedad, pero es un espacio geométrico perfectamente razonable llamado un *toro* bidimensional. Discuto esta forma más en detalle en las notas, [11] pero los únicos aspectos que hay que resaltar aquí son que, como la mesa infinita, la forma de la pantalla de videojuego es uniforme y no tiene bordes. Las aparentes fronteras que limitan al comecocos son ficticias; él puede rebasarlas y seguir en el juego.

Los matemáticos dicen que la mesa infinita y la pantalla de video-juego son formas que tienen *curvatura cero constante*. «Cero» significa que si usted examinara su reflejo en una mesa con espejo o en una pantalla de videojuego, la imagen no sufriría ninguna distorsión, y como antes, «constante» significa que la imagen parece la misma, independientemente de dónde examine su reflejo. La diferencia entre las dos formas se pone de ma-

nifiesto sólo desde una perspectiva global. Si usted hiciera un viaje por una mesa infinita y mantuviera una dirección constante, nunca volvería al punto de partida; en una pantalla de videojuego, usted podría dar la vuelta completa a la forma y se encontraría de nuevo en el punto de partida, incluso si nunca girase el volante.

Finalmente —y esto es un poco más difícil de imaginar—, una patata frita *chip*, si se extiende indefinidamente, ofrece otra forma completamente uniforme, una forma que los matemáticos dicen que tiene *curvatura negativa constante.* Esto significa que si usted viera su reflejo en cualquier punto en una patata frita especular, la imagen aparecería comprimida.

Afortunadamente, estas descripciones de formas uniformes bidimensionales se extienden sin esfuerzo a lo que realmente nos interesa: el espacio tridimensional del cosmos. Las curvaturas positiva, negativa y cero —hinchazón uniforme, contracción y ausencia de distorsión— caracterizan igualmente las formas tridimensionales uniformes. Las formas tridimensionales son difíciles de representar: cuando imaginamos formas, nuestra mente las coloca invariablemente dentro de un ambiente —un avión *en* el espacio, un planeta *en* el espacio—, pero cuando se trata del propio espacio, no hay un ambiente exterior que lo contenga. Pero somos afortunados porque las formas tridimensionales uniformes guardan una relación matemática tan estrecha con sus primas bidimensionales que se pierde poca precisión si uno hace lo que hace la mayoría de los físicos: utilizar ejemplos bidimensionales para su imaginería mental.

En la tabla adjunta hemos resumido las formas posibles, resaltando que algunas son finitas en extensión (la esfera, la pantalla de videojuego), mientras que otras son infinitas (la mesa sin fin, la patata frita sin fin). Tal como está, la Tabla 2.1 es incompleta. Hay otras posibilidades, con nombres maravillosos como el *espacio tetraédrico binario* y el *espacio dodecaédrico de Poincaré*,

que también tienen curvatura uniforme, pero no las he incluido porque son más difíciles de visualizar utilizando objetos cotidianos. Mediante un rebanado y emparejamiento adecuados pueden ser esculpidos a partir de los que he puesto en la lista, de modo que la Tabla 2.1 ofrece un buena muestra representativa. Pero estos detalles son secundarios para la conclusión principal: *la uniformidad del cosmos que se expresa en el principio cosmológico filtra sustancialmente las formas posibles del universo. Algunas de las formas posibles tienen extensión espacial infinita, mientras que otras no la tienen.*[12]

TABLA 2.1. Formas posibles para el espacio compatibles con la hipótesis de que cada localización en el universo es similar a cualquier otra (el principio cosmológico).

Forma	**Tipo de curvatura**	**Extensión espacial**
Esfera	Positiva	Finita
Tablero de mesa	Cero (o «plana»)	Infinita
Pantalla de videojuego	Cero (o «plana»)	Finita
Patata frita *chip*	Negativa	Infinita

Nuestro universo

La expansión del espacio que encontraron matemáticamente Friedmann y Lemaître se aplica *verbatim* a un universo que tiene una cualquiera de estas formas. En el caso de curvatura positiva, usamos la imaginería mental bidimensional para pensar en la superficie de un globo que se expande cuando se le infla con aire. En el caso de curvatura cero, pensamos en una lámina

elástica plana que se está estirando uniformemente en todas direcciones. En el caso de curvatura negativa, moldeamos primero dicha lámina elástica con la forma de una patata frita y luego la estiramos. Si las galaxias se modelizan como lentejuelas uniformemente salpicadas sobre cualquiera de estas superficies, la expansión del espacio da como resultado que las motas individuales —las galaxias— se alejan unas de otras, como revelaron las observaciones de Hubble de 1929 de galaxias lejanas.

Es una plantilla cosmológica convincente, pero para que sea definitiva y completa tenemos que determinar cuál de las formas uniformes describe nuestro universo. Podemos determinar la forma de un objeto familiar, tal como un *donut*, una pelota de béisbol o un bloque de hielo, tomándolo y girándolo a uno y otro lado. El problema es que no podemos hacerlo con el universo, y por ello debemos determinar su forma por medios indirectos. Las ecuaciones de la relatividad general proporcionan una estrategia matemática. Muestran que la curvatura del espacio se reduce a una única cantidad observacional: la densidad de materia (más exactamente, la densidad de materia y energía) en el espacio. Si hay mucha materia, la gravedad hará que el espacio se curve sobre sí mismo y dé una forma esférica. Si hay poca materia, el espacio es libre para dilatarse en la forma de patata frita. Y si hay la cantidad justa de materia, el espacio tendrá curvatura cero.[13]

Las ecuaciones de la relatividad general proporcionan también una precisa demarcación numérica entre las tres posibilidades. Las matemáticas muestran que «la cantidad justa de materia», la denominada densidad crítica, es hoy de unos 2×10^{-29} gramos por centímetro cúbico, que son unos seis átomos de hidrógeno por metro cúbico o, en términos más familiares, el equivalente a una sola gota de lluvia en cada volumen del tamaño de la Tierra.[14] Si miramos a nuestro alrededor puede parecer que el universo supera la densidad crítica, pero ésa sería una

conclusión precipitada. El cálculo matemático de la densidad crítica supone que la materia está uniformemente dispersa a lo largo del espacio. De modo que hay que imaginar que se toma la Tierra, la Luna, el Sol y todo lo demás, y que los átomos que contienen se dispersan uniformemente a lo largo del cosmos. La pregunta entonces es si en cada metro cúbico habría una masa mayor o menor que la de seis átomos de hidrógeno.

Puesto que las consecuencias cosmológicas son importantes, durante décadas los astrónomos han tratado de medir la densidad media de materia en el universo. Su método es simple. Con potentes telescopios observan meticulosamente grandes volúmenes de espacio y suman las masas de las estrellas que pueden ver, así como la de cualquier otro material cuya presencia pueden inferir del estudio del movimiento estelar y galáctico. Hasta hace poco tiempo las observaciones indicaban que la densidad media era de sólo el 27 por 100 de la densidad crítica —el equivalente a unos dos átomos de hidrógeno por cada metro cúbico— lo que implicaría un universo curvado negativamente.

Pero más tarde, a finales de los años noventa, sucedió algo extraordinario. A partir de magníficas observaciones y una cadena de razonamientos que exploraremos en el capítulo 6, los astrónomos se dieron cuenta de que habían estado pasando por alto un componente esencial de la cuenta: una energía difusa que parece estar uniformemente dispersa a lo largo del espacio. Los datos provocaron una conmoción. ¿Una energía que baña el espacio? Esto suena como la constante cosmológica, que, como hemos visto, Einstein había introducido ocho décadas antes, aunque luego se retractara. ¿Habían resucitado las observaciones modernas la constante cosmológica?

Aún no estamos seguros. Incluso hoy, una década después de las observaciones iniciales, los astrónomos aún tienen que establecer si la energía uniforme es fija o si la cantidad de energía en una región del espacio dada varía con el tiempo. Una

constante cosmológica, como dice su nombre (y como implica su representación matemática por un único número fijo en la declaración de renta de la relatividad general), sería invariable. Para explicar la posibilidad más general de que la energía evolucione, y también para resaltar que la energía no emite luz (lo que explica por qué no ha sido detectada durante tanto tiempo), los astrónomos han acuñado un término nuevo: *energía oscura*. «Oscura» describe también las muchas lagunas que hay en nuestro conocimiento. Nadie puede explicar el origen, la composición fundamental o las propiedades detalladas de la energía oscura —cuestiones actualmente bajo intensa investigación a las que volveremos en capítulos posteriores—.

Pero, incluso con todas estas cuestiones abiertas, observaciones detalladas a través del Telescopio Espacial Hubble y otros observatorios basados en tierra han llegado a un consenso sobre la cantidad de energía oscura que ahora permea el espacio. El resultado difiere de lo que Einstein propuso hace tiempo (puesto que él planteaba un valor que daría un universo estático, mientras que nuestro universo se está expandiendo). Eso no es sorprendente. Más bien, lo que resulta notable es que las medidas han concluido que la energía oscura que llena el espacio aporta aproximadamente el 73 por 100 de la densidad crítica. Cuando se suma al 27 por 100 de criticalidad que los astrónomos ya habían medido, esto eleva el total hasta el 100 por 100 de la densidad crítica, la cantidad justa de materia y energía para un universo con curvatura espacial cero.

Así pues, los datos actuales apoyan un universo en continua expansión con una forma similar a la versión tridimensional de la mesa infinita o de la pantalla de videojuego finita.

Al principio de este capítulo he advertido que no sabemos si el universo es finito o infinito. En las secciones precedentes se ha argumentado que ambas posibilidades surgen de forma natural de nuestros estudios teóricos, y que ambas posibilidades son compatibles con las observaciones y medidas astrofísicas más refinadas. ¿Cómo podríamos determinar observacionalmente qué posibilidad es la correcta?

Es una cuestión peliaguda. Si el espacio es finito, entonces parte de la luz emitida por estrellas y galaxias podría dar muchas vueltas al cosmos antes de entrar en nuestros telescopios. Igual que las imágenes repetidas que se generan cuando la luz rebota entre espejos paralelos, la luz que da vueltas daría lugar a imágenes repetidas de estrellas y galaxias. Los astrónomos han buscado tales imágenes múltiples, pero aún no han encontrado ninguna. Esto, por sí mismo, no prueba que el espacio sea infinito, pero sugiere que si el espacio es finito, puede ser tan grande que la luz no ha tenido tiempo de completar múltiples vueltas alrededor de la pista de carreras cósmica. Y eso muestra la dificultad observacional. Incluso si el universo es finito, cuanto más grande es, mejor puede enmascararse como si fuera infinito.

En el caso de algunas preguntas cosmológicas, tales como la edad del universo, la distinción entre las dos posibilidades no desempeña ningún papel. Ya sea el cosmos finito o infinito, en tiempos cada vez más remotos, más próximas habrían estado las galaxias, lo que haría el universo más denso, más caliente y más extremo. Podemos utilizar las observaciones actuales sobre la velocidad de expansión, junto con el análisis teórico de cómo ha cambiado esta velocidad con el tiempo, para calcular cuánto tiempo ha transcurrido desde que todo lo que vemos habría es-

tado comprimido en una única pepita fantásticamente densa, lo que podemos llamar el principio. Y ya sea finito o infinito el universo, los análisis recientes establecen que ese momento fue hace unos 13.700 millones de años.

Pero, para otras consideraciones, la distinción finito-infinito sí cuenta. En el caso finito, por ejemplo, cuando consideramos el cosmos en tiempos cada vez más remotos, es aproximado representar la totalidad del espacio en continua contracción. Aunque las matemáticas dejan de ser válidas en el mismo instante cero, el universo es una mota cada vez más pequeña. En el caso infinito, sin embargo, esta descripción es errónea. Si el espacio es realmente infinito en tamaño, entonces siempre lo ha sido y siempre lo será. Cuando se contrae, sus contenidos están cada vez más juntos, lo que hace la densidad de materia cada vez mayor. Pero su extensión total sigue siendo infinita. Después de todo, contraiga una mesa infinita en un factor 2; ¿qué obtiene? La mitad de infinito, que sigue siendo infinito. Contráigala en un factor de un millón; ¿qué obtiene? También infinito. Cuanto más próximo al instante cero se considera un universo infinito, más denso se hace en cada lugar, pero su extensión espacial sigue sin tener fin.

Aunque las observaciones dejan sin decidir la cuestión finito *versus* infinito, mi experiencia es que, cuando se les apremia a pronunciarse, físicos y cosmólogos suelen preferir la proposición de que el universo es infinito. Creo que esta idea está enraizada, en parte, en la circunstancia histórica de que durante muchas décadas los investigadores prestaron poca atención a la forma finita de videojuego, fundamentalmente porque su análisis matemático es más complejo. Quizá la idea refleja también una extendida y falsa concepción según la cual la diferencia entre un universo infinito y un universo finito pero enorme es una distinción cosmológica que sólo tiene interés académico. Después de todo, si el espacio es tan grande que sólo tendre-

mos acceso a una pequeña porción de su totalidad, ¿deberíamos preocuparnos de si se extiende a una distancia finita o a una distancia infinita más allá de donde podemos ver?

Deberíamos hacerlo. La cuestión de si el espacio es finito o infinito tiene un profundo impacto sobre la naturaleza misma de la realidad. Lo que nos lleva al corazón de este capítulo. Consideremos ahora la posibilidad de un cosmos infinitamente grande y exploremos sus implicaciones. Con mínimo esfuerzo, nos encontraremos habitando uno de una colección infinita de mundos paralelos.

El espacio infinito y el mosaico

Empecemos simplemente, de vuelta a la Tierra, lejos de los vastos confines de una extensión cósmica infinita. Imagine que su amiga Imelda, para satisfacer su inclinación por la variedad en su atuendo, ha adquirido quinientos vestidos ricamente bordados y mil pares de zapatos de diseño. Si cada día se pone un vestido con un par de zapatos, en algún momento agotará todas las combinaciones posibles y repetirá un conjunto anterior. Es fácil calcular cuándo será. Quinientos vestidos y mil pares de zapatos dan quinientas mil combinaciones diferentes. Quinientos mil días son unos mil cuatrocientos años, de modo que, si vive el tiempo suficiente, Imelda vestiría un conjunto que ya había llevado. Si Imelda, bendecida con una longevidad infinita, continuara repitiendo todas las combinaciones posibles, necesariamente tendría que llevar cada uno de sus conjuntos un número infinito de veces. Un número infinito de apariciones con un número finito de conjuntos asegura una repetición infinita.

Siguiendo con el mismo tema, imagine que Randy, un experto jugador de cartas, ha barajado un número gigantesco de mazos, uno por uno, y los ha apilado limpiamente uno al lado de otro. ¿Puede ser diferente el orden da las cartas en cada mazo barajado, o deben repetirse? La respuesta depende del número de mazos. Cincuenta y dos cartas pueden disponerse de 80.658.175.170.943.878.571.660.636.856.403.766.975.289.505.440.883.277.824.000.000.000.000 maneras diferentes (52 posibilidades para la carta que quede primera, multiplicado por 51 posibilidades restantes para la que quede segunda, multiplicado por 50 posibilidades restantes para la carta siguiente, y así sucesivamente). Si el número de mazos que baraja Randy superara el número de diferentes disposiciones de cartas posibles, entonces alguno de los mazos barajados se repetiría. Si Randy barajara un número infinito de mazos, las disposiciones de las cartas se repetirían necesariamente un número infinito de veces. Como sucede con Imelda y sus conjuntos, un número infinito de ocurrencias con un número finito de configuraciones posibles asegura que los resultados se repiten infinitamente.

La idea básica es esencial para la cosmología en un universo infinito. Dos pasos clave muestran por qué.

En un universo infinito, la mayoría de las regiones está más allá de lo que podemos ver, incluso utilizando los más potentes telescopios posibles. Aunque la luz viaja a una enorme velocidad, si un objeto está suficientemente lejano, la luz que emite —incluso la luz que quizá haya sido emitida inmediatamente después del big bang— no ha tenido tiempo suficiente para llegar a nosotros. Puesto que el universo tiene unos 13.700 millones de años, usted podría pensar que cualquier cosa que esté a más de 13.700 millones de años luz entraría en esta categoría. El razonamiento que hay tras esta idea va directo al blanco, pero la expansión del espacio aumenta la distancia a los objetos cuya luz ha estado viajando mucho tiempo y acaba de recibirse;

de modo que la distancia máxima que podemos ver es en realidad mayor, unos 41.000 millones de años luz.[15] Pero los números exactos son lo de menos. El punto importante es que las regiones del universo más allá de cierta distancia son regiones que están actualmente más allá de nuestro alcance observacional. Así como los barcos que han navegado hasta más allá del horizonte no son visibles para alguien que se ha quedado en la costa, los astrónomos dicen que objetos en el espacio que están demasiado lejos para ser vistos están más allá de nuestro *horizonte cósmico*.

Del mismo modo, la luz que estamos emitiendo no puede haber llegado aún a esas regiones distantes, de modo que estamos más allá de su horizonte cósmico. Y no se trata de que los horizontes cósmicos por sí solos determinen lo que alguien puede o no puede ver. Desde la relatividad especial de Einstein sabemos que ninguna señal, ninguna perturbación, ninguna información, *nada* puede viajar más rápido que la luz —lo que significa que regiones del universo tan apartadas que la luz no ha tenido tiempo de viajar de una a otra son regiones que nunca han intercambiado ninguna influencia de ningún tipo, y por ello han evolucionado de forma completamente independiente —.

Utilizando una analogía bidimensional, podemos comparar la extensión del espacio, en un instante de tiempo dado, con un mosaico o una colcha gigante (hecha con retazos circulares) en el que cada retazo representa un único horizonte cósmico. Alguien localizado en el centro de un retazo puede haber interaccionado con cualquier cosa que esté en el mismo retazo, pero no ha tenido contacto con algo que esté en un retazo diferente (véase Figura 2.1a) porque están demasiado lejos. Puntos que están situados cerca de la frontera entre dos retazos están más próximos que los centros respectivos, y por lo tanto pueden haber interaccionado; pero si consideramos, digamos, retazos

en todas las demás filas y todas las demás columnas de la colcha cósmica, los puntos que residen en retazos diferentes están ahora tan lejos unos de otros que no podría haber tenido lugar ninguna interacción entre ellos (véase Figura 2.1b). La misma idea se aplica en tres dimensiones, donde los horizontes cósmicos —los retazos en la colcha cósmica—son esféricos, y es válida la misma conclusión: retazos suficientemente distantes están más allá de sus esferas de influencia y por ello son dominios independientes.

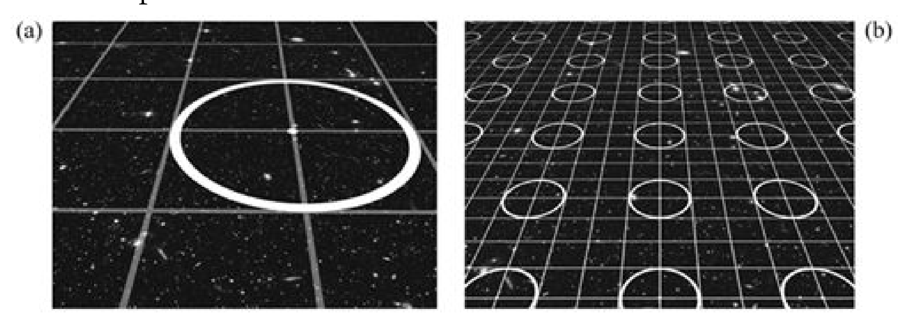


FIGURA 2.1. *(a) Debido a la velocidad finita de la luz, un observador en el centro de cualquier región (llamada el horizonte cósmico del observador) sólo puede haber interaccionado con cosas localizadas en la misma región. (b) Horizontes cósmicos suficientemente distantes están demasiado separados para haber tenido interacciones, y por ello han evolucionado de forma completamente independiente unos de otros.*

Si el espacio es grande pero finito, podemos dividirlo en un número grande pero finito de tales regiones independientes. Si el espacio es infinito, entonces hay un número *infinito* de regiones independientes. Es esta última posibilidad la que tiene un particular atractivo, y la segunda parte del argumento dice por qué. Como veremos ahora, en cualquier región dada las partículas de materia (más exactamente, materia y todas las formas de energía) pueden ser dispuestas en sólo un número finito de configuraciones diferentes. Utilizando el razonamiento ensayado con Imelda y Randy, esto significa que las condiciones en la

infinidad de regiones remotas —en regiones del espacio como la que habitamos pero distribuidas a lo largo de un cosmos ilimitado— *se repiten necesariamente*.

Posibilidades finitas

Imagine que es una noche de verano calurosa y que una molesta mosca zumba en su dormitorio. Usted ha probado el matamoscas, ha probado con el desagradable *spray*. Nada ha funcionado. Desesperado, usted trata de razonar. «Este dormitorio es muy grande», le dice a la mosca. «Podrías estar en muchos otros lugares. No hay ninguna razón para que te quedes zumbando cerca de mi oreja». «¿De verdad?», contesta la mosca con malicia. «¿Cuántos lugares hay?».

En un universo clásico, la respuesta es «infinitos». Como usted dice a la mosca, ella (o, más exactamente, su centro de masas) podría moverse 3 metros a la izquierda, o 2,5 metros a la derecha, o 2,236 metros arriba, o 1,195829 metros abajo, o… ya se hace usted una idea. Puesto que la posición de la mosca puede variar de forma continua, hay infinitos lugares en los que puede estar. De hecho, cuando le explica todo esto a la mosca, usted se da cuenta de que no sólo hay una infinita variedad de posiciones para la mosca, sino que también la hay para su velocidad. En un instante la mosca puede estar aquí, dirigiéndose hacia la derecha a un kilómetro por hora. O podría estar dirigiéndose hacia la izquierda a medio kilómetro por hora, o hacia arriba a un cuarto de kilómetro por hora, o hacia abajo a 0,349283 kilómetros por hora, y así sucesivamente. Aunque hay varios factores que limitan la velocidad de la mosca (entre ellos la energía limitada que posee, puesto que cuanto más rápido

vuela, más energía tiene que gastar), dicha velocidad puede variar de forma continua y con ello proporciona otra fuente de variedad infinita.

Pero la mosca no está convencida. «Yo te sigo cuando hablas de un desplazamiento de un centímetro, o medio centímetro, o incluso un cuarto de centímetro», responde la mosca. «Pero me pierdo cuando hablas de posiciones que difieren en una diezmilésima o una cienmilésima de centímetro, o incluso menos. Para un experto, ésas podrían ser posiciones diferentes, pero va en contra de la experiencia decir que *aquí* y una milmillonésima de centímetro a la izquierda de *aquí* son realmente diferentes. Yo no puedo sentir un cambio tan minúsculo de posición y por ello no los cuento como lugares diferentes. Lo mismo sucede con la velocidad. Puedo ver la diferencia entre ir a un kilómetro por hora e ir a la mitad de esta velocidad. Pero ¿la diferencia entre 0,25 kilómetros por hora y, 0,2499999999 kilómetros por hora? ¡Por favor! Sólo una mosca muy sabia afirmaría ser capaz de ver la diferencia. El hecho es que ninguna de nosotras puede hacerlo. Por lo que a mí concierne, son las mismas velocidades. Hay mucha menos variedad disponible que la que tú me estás diciendo».

La mosca ha planteado un punto importante. En principio, ella puede ocupar una infinita variedad de posiciones y alcanzar una infinita variedad de velocidades. Pero en cualquier sentido práctico hay un límite a cuán finas pueden ser las diferencias en posición y velocidad para que pasen completamente inadvertidas. Esto es cierto incluso si la mosca emplea el mejor equipo. Siempre hay un límite a lo pequeño que puede ser un incremento en la posición y en la velocidad para quedar registrado. Y no importa lo pequeños que sean estos incrementos mínimos, con tal de que no sean cero; ellos reducen radicalmente el abanico de la experiencia posible.

Por ejemplo, si los incrementos más pequeños que pueden detectarse son de una centésima de centímetro, entonces cada centímetro no ofrece un número infinito de localizaciones detectablemente diferentes, sino sólo un centenar. Cada centímetro cúbico proporcionaría así 100^3 = 1.000.000 localizaciones diferentes, y un dormitorio medio ofrecería aproximadamente cien billones. No es fácil saber si la mosca encontraría este conjunto de opciones suficientemente impresionante como para alejarse de su oreja. La conclusión, sin embargo, es que *todo lo que no sean medidas con perfecta resolución reduce el número de posibilidades de infinito a finito*.

Usted podría replicar que la incapacidad para distinguir entre minúsculas separaciones espaciales o diferencias en velocidad no refleja nada más que una limitación tecnológica. Con el progreso, la precisión de los aparatos será cada vez mejor, de modo que el número de distintas posiciones discernibles y velocidades disponibles para una mosca con posibles también aumentará. Aquí debo apelar a la teoría cuántica básica. Según la mecánica cuántica, hay un sentido preciso en el que existe un límite fundamental a la precisión que puede tener una medida concreta, y este límite nunca puede sobrepasarse, por muchos que sean los progresos tecnológicos: nunca. El límite surge de una característica fundamental de la mecánica cuántica, el *principio de incertidumbre*.

El principio de incertidumbre establece que, no importa los aparatos que usted utilice o las técnicas que emplee, aumentar la resolución de las medidas de una propiedad tiene un coste inevitable: necesariamente se reduce la precisión con que se puede medir una propiedad complementaria. Por ejemplo, el principio de incertidumbre muestra que cuanto más precisamente se mide la posición de un objeto, con menos precisión puede medirse su velocidad, y viceversa.

Desde la perspectiva de la física clásica, en la que se basa casi toda nuestra intuición sobre la marcha del mundo, esta limitación es completamente ajena. Pero a modo de analogía algo tosca, piense en que toma fotografías de esta mosca malévola. Si utiliza una alta velocidad de su obturador, obtendrá una imagen precisa que registra la posición de la mosca en el momento en que usted tomó la foto. Pero puesto que la foto es estática, la mosca aparece inmóvil; la imagen no da información sobre la velocidad de la mosca. Si usted pone una baja velocidad en su obturador, la imagen borrosa resultante transmite algo del movimiento de la mosca, pero por esa misma borrosidad también proporciona una medida imprecisa de la posición de la mosca. Usted no puede tomar una foto que dé información precisa sobre la posición y la velocidad simultáneamente.

Utilizando las matemáticas de la mecánica cuántica, Werner Heisenberg proporcionó un límite preciso a cuán imprecisas son necesariamente las medidas combinadas de posición y velocidad. Esta imprecisión inevitable es lo que la mecánica cuántica entiende por incertidumbre. Para nuestros fines, hay una manera particularmente útil de encuadrar su resultado. Así como una fotografía más nítida requiere que usted utilice una velocidad del obturador más alta, las matemáticas de Heisenberg muestran que una medida más nítida de la posición de un objeto requiere que se utilice una sonda de energía más alta. Encienda la lámpara de su mesilla de noche, y la sonda resultante —luz difusa y de baja energía— le permite discernir la forma general de las patas y los ojos de la mosca; ilumínela con fotones de mayor energía, como rayos X (manteniendo corta la ráfaga de fotones para que no la abrase), y la mejor resolución revela los diminutos músculos que mueven las alas de la mosca. Pero una perfecta resolución, según el principio de Heisenberg, requiere una sonda con energía infinita. Eso es inalcanzable.

Y con esto llegamos a la conclusión esencial. La física clásica deja claro que una perfecta resolución es inalcanzable en la práctica. La física cuántica va más lejos y establece que la perfecta resolución es inalcanzable en teoría. Si usted imagina a la vez la posición y la velocidad de un objeto —sea una mosca o un electrón— que cambian en cantidades suficientemente pequeñas, entonces, según la mecánica cuántica, está imaginando algo sin significado. Cambios demasiado pequeños para ser medidos, ni siquiera en teoría, no son cambios en absoluto.[16]

Por el mismo razonamiento que utilizamos en nuestro análisis precuántico de la mosca, el límite en la resolución reduce de infinito a finito el número de posibilidades distintas para la posición y la velocidad de un objeto. Y puesto que la resolución limitada que implica la mecánica cuántica está entretejida en las mismas fibras de la ley física, esta reducción a posibilidades finitas es inevitable e incuestionable.

Repetición cósmica

Dejemos las moscas en los dormitorios y pasemos a considerar una región más grande del espacio. Consideremos una región del tamaño actual del horizonte cósmico, una esfera con un radio de 41.000 millones de años luz. Es decir, una región que es del tamaño de un único retazo en la colcha cósmica. Y considerémosla llena no con una única mosca, sino con partículas de materia y radiación. La pregunta ahora es: ¿cuántas disposiciones diferentes de las partículas son posibles?

Bueno, como sucede con una caja de Lego, cuantas más piezas tiene usted —cuanta más materia y radiación pone en la región— mayor es el número de disposiciones posibles. Pero no

puede añadir piezas indefinidamente. Las partículas llevan energía, de modo que más partículas significa más energía. Si una región del espacio contiene demasiada energía, colapsará bajo su propio peso y formará un agujero negro.[17] Y si después de que se haya formado un agujero negro usted trata de meter aún más materia y energía en la región, la frontera del agujero negro (su horizonte de sucesos) crecerá y abarcará más espacio. Hay así un límite a cuánta materia y energía puede haber dentro de una región de espacio de un tamaño dado. Para una región del espacio tan grande como el horizonte cósmico actual, los límites implicados son enormes (del orden de 10^{56} gramos). Pero el tamaño del límite no es lo importante. Lo importante es que *hay* un límite.

Energía finita dentro de un horizonte cósmico implica un número finito de partículas, sean electrones, protones, neutrinos, muones, fotones y cualquier otra especie conocida o todavía no identificada en el zoo de las partículas. Energía finita dentro de un horizonte cósmico implica también que cada una de estas partículas, como la molesta mosca de su dormitorio, tiene un número finito de posibles posiciones y velocidades distintas. En conjunto, un número finito de partículas, cada una de las cuales puede tener muchas posiciones y velocidades distintas, significa que dentro de cualquier horizonte cósmico sólo hay disponible un número finito de disposiciones de partículas diferentes. (En el lenguaje más refinado de la teoría cuántica, que encontraremos en el capítulo 8, no hablamos de posiciones y velocidades de las partículas *per se*, sino más bien del *estado cuántico* de dichas partículas. Desde esta perspectiva, diríamos que hay solamente un número finito de estados cuánticos distintos mediante observación para las partículas en la región cósmica). De hecho, un corto cálculo —descrito en las notas, si tiene usted curiosidad por los detalles— revela que el número de posibles configuraciones distintas de las partículas dentro de

un horizonte cósmico es del orden de $10^{10^{122}}$ (un 1 seguido de 10^{122} ceros). Aunque éste es un número enorme, es decididamente finito.[18]

El número limitado de combinaciones de vestuario diferentes asegura que con suficientes salidas, el atuendo de Imelda se repetirá necesariamente. El número limitado de diferentes disposiciones de cartas de baraja asegura que con suficientes mazos, el resultado del barajado de Randy se repetirá necesariamente. Por el mismo razonamiento, el número limitado de disposiciones de partículas asegura que con suficientes retazos en la colcha cósmica —suficientes horizontes cósmicos independientes— *las disposiciones de partículas, comparadas retazo a retazo, deben repetirse en alguna parte*. Incluso si usted fuera capaz de jugar a diseñador cósmico y tratara de disponer que cada retazo fuera diferente de los que había examinado con anterioridad, con una extensión suficientemente grande habría llegado a agotar finalmente los diseños diferentes y se vería obligado a repetir una disposición previa.

En un universo infinitamente grande, la repetición es aún más extrema. Hay infinitos retazos en una extensión infinita de espacio; así, con sólo un número finito de disposiciones de partículas diferentes, las disposiciones de partículas dentro de los retazos deben repetirse un número infinito de veces.

Éste es el resultado que buscábamos.

Nada más que física

Al interpretar las implicaciones de esta afirmación, debería confesar mi sesgo. Creo que un sistema físico está completa-

mente determinado por la disposición de sus partículas. Dígame cómo están dispuestas las partículas que constituyen la Tierra, el Sol, la galaxia y todo lo demás, y usted tiene una realidad plenamente articulada. Esta visión reduccionista es común entre los físicos, pero hay personas que piensan de otra manera. Especialmente cuando se trata de la vida, algunos creen que es necesario un aspecto esencial no físico (espíritu, alma, fuerza vital, *chi* o lo que sea) para animar lo físico. Aunque yo estoy abierto a esta posibilidad, nunca he encontrado ninguna prueba que la apoye. La postura que tiene más sentido para mí es que las características físicas y mentales de uno no son otra cosa que una manifestación de cómo están dispuestas las partículas del cuerpo. Especifique la disposición de las partículas y habrá especificado todo.[19]

Adhiriéndonos a esta perspectiva, concluimos que si la disposición de partículas que nos es familiar estuviera duplicada en otra región —otro horizonte cósmico—, esa región se parecería a la nuestra en todo. Esto significa que si el universo tiene una extensión infinita, usted no es el único que está teniendo esta reacción ante esta visión de la realidad. Hay muchas copias perfectas de usted en el cosmos, que sienten exactamente lo mismo. Y no hay manera de decir cuál es realmente usted. Todas las versiones son físicamente, y con ello mentalmente, idénticas.

Incluso podemos estimar la distancia a la copia más próxima. Si las disposiciones de partículas están distribuidas aleatoriamente de una región a otra (una hipótesis compatible con la refinada teoría cosmológica que encontraremos en el próximo capítulo), entonces cabe esperar que las condiciones en nuestra región estén duplicadas con tanta frecuencia como en cualquier otra. En cada conjunto de $10^{10^{122}}$ regiones cósmicas, esperamos que haya, en promedio, una región como la nuestra. Es decir, en cada región del espacio que sea de aproximadamente $10^{10^{122}}$

metros de diámetro, debería haber una región cósmica que es réplica de la nuestra —una que le contiene a usted, a la Tierra, la galaxia y cualquier otra cosa que habita en nuestro horizonte cósmico—.

Si usted rebaja sus expectativas y no busca una réplica exacta de nuestro horizonte cósmico entero, sino que se satisfaría con una copia exacta de una región de unos pocos años luz de radio y centrada en nuestro Sol, el encargo es más fácil de satisfacer: en promedio, en cada región de unos $10^{10^{100}}$ metros debería encontrar usted una copia. Más fácil todavía es encontrar copias aproximadas. Después de todo, hay sólo una manera de duplicar exactamente una región, pero muchas maneras de *casi* duplicarla. Si usted visitara estas copias inexactas, encontraría algunas que son apenas distinguibles de la nuestra, mientras que en otras las diferencias irían desde lo obvio hasta lo ridículo y hasta lo escandaloso. Cada decisión que usted haya tomado alguna vez es equivalente a una disposición concreta de partículas. Si usted giró a la izquierda, sus partículas iban en una dirección; si giró a la derecha, sus partículas iban en otra. Si usted dijo sí, las partículas en su cerebro, labios y cuerdas vocales siguieron una pauta; si dijo no, siguieron una pauta diferente. Y así, cada acción posible, cada elección que usted haya hecho y cada opción que haya descartado, estará representada en una región u otra. En algunas, sus peores temores sobre usted mismo, su familia y la vida en la Tierra se habrán realizado. En otras, se han realizado sus sueños más fantásticos. Y en otras, las diferencias que surgen de disposiciones de partículas próximas pero diferentes se han combinado para dar un entorno irreconocible. Y en la mayoría de las regiones, la complexión de partículas no incluiría las disposiciones altamente especializadas que reconocemos como organismos vivos, de modo que las regiones carecerían de vida, o al menos carecerían de vida tal como la conocemos.

Con el tiempo, el tamaño de las regiones cósmicas expuestas en la Figura 2.1b aumentará; con más tiempo, la luz puede viajar más lejos, y con ello cada uno de los horizontes cósmicos se hará más grande. Finalmente, los horizontes cósmicos se solaparán. Y cuando lo hagan, las regiones ya no pueden considerarse separadas y aisladas, los universos paralelos ya no serán paralelos: se habrán fusionado. Sin embargo, el resultado al que hemos llegado seguirá siendo válido. Simplemente establece una nueva malla de regiones cósmicas con un tamaño de región impuesto por la distancia que puede haber viajado la luz desde el big bang hasta este instante posterior. Las regiones serán más grandes, de modo que para llenar una pauta como la de la Figura 2.1b sus centros tendrán que estar más apartados; pero con un espacio infinito a nuestra disposición, hay lugar más que suficiente para acomodar este ajuste.[20]

Y así hemos llegado a una conclusión que es general y provocativa a la vez. La realidad en un cosmos infinito no es lo que la mayoría de nosotros esperaría. En cualquier instante de tiempo, la extensión del espacio contiene un número infinito de dominios separados —constituyentes de lo que llamaré el *multiverso mosaico*— de los de nuestro universo observable; todo lo que vemos en el vasto cielo nocturno no es más que un miembro. Sondeando esta colección infinita de dominios separados, encontramos que las disposiciones de partículas necesariamente se repiten infinitas veces. La realidad que es válida en cualquier universo dado, incluido el nuestro, está así replicada en un número infinito de otros universos a lo largo del multiverso mosaico.[21]

¿Qué hacer con esto?

Es posible que la conclusión a la que hemos llegado le parezca tan extraña que esté usted inclinado a volver la discusión del revés. Podría argumentar que la extraña naturaleza de la que hemos partido —copias infinitas de usted, y de todos, y de todas las cosas— es prueba de la errónea naturaleza de una o más de las hipótesis que nos han llevado a ello.

¿Podría ser falsa la hipótesis de que el cosmos entero está poblado por partículas? Quizá más allá de nuestro horizonte cósmico hay un vasto dominio que sólo contiene espacio vacío. Es posible, pero las contorsiones teóricas que se requieren para acomodar esa imagen la hacen completamente inverosímil. Las teorías cosmológicas más refinadas, que pronto encontraremos, no nos llevan a nada que se le parezca.

¿Podrían cambiar las propias leyes de la física más allá de nuestro horizonte cósmico, corrompiendo nuestra capacidad para hacer cualquier análisis teórico fiable de estos dominios distantes? Una vez más, es posible. Pero como veremos en el próximo capítulo, desarrollos recientes dan un argumento convincente según el cual, aunque las leyes puedan variar, esa variación no invalida nuestras conclusiones con respecto al multiverso mosaico.

¿Podría ser finita la extensión espacial del universo? Por supuesto. Decididamente es posible. Si el espacio fuera finito, pero suficientemente grande, podría seguir habiendo algunas regiones físicamente interesantes. Pero un universo finito más pequeño fácilmente dejaría de tener espacio adecuado para acomodar números sustanciales de regiones distintas, y mucho menos unas que sean duplicados de la nuestra. Un universo finito plantea la manera más convincente de darle la vuelta al multiverso mosaico.

Pero en las últimas décadas, físicos que trabajaban para retrotraer la teoría del big bang hasta el tiempo cero —en bús-

queda de una comprensión más profunda del origen y la naturaleza del átomo primordial de Lemaître— han elaborado un enfoque llamado *cosmología inflacionaria*. En el marco inflacionario, el argumento en apoyo de un cosmos infinitamente grande no sólo reúne fuerte apoyo observacional y teórico sino que, como veremos en el próximo capítulo, se convierte en una conclusión casi inevitable.

Y lo que es más, la inflación trae a primer plano otra variedad, aún más exótica, de universos paralelos.

3

Eternidad e infinito

El multiverso inflacionario

A mediados del siglo XX, un grupo pionero de físicos se dio cuenta de que si se pudiera apagar el Sol, se eliminaran las demás estrellas de la Vía Láctea e incluso se hicieran desaparecer las galaxias más lejanas, el espacio no sería negro. Para el ojo humano parecería negro, pero si usted pudiera ver la radiación en la región de microondas del espectro, entonces a cualquier lugar adonde mirara vería un resplandor uniforme. ¿Su origen? *El* origen. Sorprendentemente, estos físicos descubrieron un mar ubicuo de radiación de microondas que llena el espacio y que es una reliquia actual de la creación del universo. La historia de este importante descubrimiento narra un logro extraordinario de la teoría del big bang, pero con el tiempo también puso de manifiesto una de las insuficiencias fundamentales de la teoría y con ello fijó el escenario para el siguiente descubrimiento mayor en cosmología después de los trabajos pioneros de Friedmann y Lemaître: la *teoría inflacionaria*.

La cosmología inflacionaria modifica la teoría del big bang al insertar un intenso brote de expansión enormemente rápida durante los primeros momentos del universo. Esta modificación, como veremos, resulta esencial para explicar algunas características, de otro modo desconcertantes, de la radiación reliquia. Pero más que eso, la cosmología inflacionaria es un capítulo clave en nuestra historia porque los científicos han comprendido poco a poco durante las últimas décadas que las ver-

siones más convincentes de la teoría dan una vasta colección de universos paralelos, lo que transforma de manera radical el carácter de la realidad.

Reliquias de un comienzo caliente

George Gamow, un larguirucho físico de casi dos metros de altura conocido por sus importantes contribuciones a la física cuántica y la física nuclear en la primera mitad del siglo XX, era tan ingenioso y bromista como temerario. (En 1932, él y su mujer intentaron abandonar la Unión Soviética atravesando el mar Negro en un kayak bien abastecido con un buen surtido de chocolate y coñac; cuando las malas condiciones meteorológicas devolvieron a los fugitivos a la costa, Gamow fue capaz de engañar a las autoridades con una historia sobre los experimentos científicos desgraciadamente fracasados que había estado realizando en el mar). En los años cuarenta, después de haber cruzado con éxito el telón de acero (por tierra, y con menos chocolate) y haberse establecido en la Universidad Washington en St. Louis, Gamow dirigió su atención a la cosmología. Con la ayuda técnica de su doctorando Ralph Alpher, un estudiante de un talento extraordinario, la investigación de Gamow dio como resultado una imagen de los primeros momentos del universo mucho más vívida y detallada que la que había revelado el trabajo anterior de Friedmann (que había sido profesor de Gamow en Leningrado) y Lemaître. Con una pequeña puesta al día, la imagen de Gamow y Alpher es como sigue.

Inmediatamente después de su nacimiento, el universo extraordinariamente denso y caliente experimentó una actividad frenética. El espacio se expandió y enfrió rápidamente, lo que per-

mitió que un mar de partículas se formara a partir del plasma primordial. Aunque en rápido descenso, durante los tres primeros minutos la temperatura permaneció suficientemente alta para que el universo actuara como un horno nuclear cósmico y se sintetizaran los núcleos atómicos más sencillos: hidrógeno, helio y cantidades en traza de litio. Pero pasados algunos minutos más, la temperatura cayó hasta unos 10^8 grados Kelvin (K), aproximadamente diez mil veces la temperatura de la superficie del Sol. Aunque enormemente alta para los niveles cotidianos, esta temperatura era demasiado baja para sostener más procesos nucleares, por lo que a partir de este momento el tumulto de partículas se detuvo prácticamente. Durante los eones que siguieron no sucedieron muchas cosas excepto que el espacio siguió expandiéndose y el baño de partículas siguió enfriándose.

Luego, unos 370.000 años más tarde, cuando el universo se había enfriado hasta unos 3.000 K (la mitad de la temperatura de la superficie del Sol), la monotonía cósmica fue interrumpida por un giro de los acontecimientos. Hasta entonces, el espacio había estado lleno de un plasma de partículas que llevaban carga eléctrica, básicamente protones y electrones. Puesto que las partículas eléctricamente cargadas son las únicas con capacidad de dispersar fotones —partículas de luz—, el plasma primordial habría parecido opaco; los fotones, incesantemente zarandeados por electrones y protones, habrían producido un resplandor difuso similar a las luces de un automóvil en una densa niebla. Pero cuando la temperatura cayó por debajo de 3.000 K, el movimiento de electrones y núcleos se frenó lo suficiente como para amalgamarse en átomos; los electrones fueron capturados por los núcleos atómicos y quedaron atrapados en órbita alrededor de ellos. Ésta fue una transformación clave. Puesto que protones y electrones tienen cargas iguales pero opuestas, sus uniones en átomos son eléctricamente neutras. Y

puesto que un plasma de compuestos eléctricamente neutros permite que los fotones lo atraviesen igual que un cuchillo caliente atraviesa la mantequilla, la formación de átomos permitió que la niebla cósmica aclarara y se liberara el eco cósmico del big bang. Desde entonces, los fotones primordiales han estado cruzando el espacio.

Bueno…, con una reserva importante. Aunque ya no zarandeados por partículas eléctricamente cargadas, los fotones han estado sometidos a otra influencia importante. A medida que el espacio se expande, las cosas se diluyen y se enfrían, incluidos los fotones. Pero a diferencia de las partículas de materia, los fotones no se frenan cuando se enfrían; al ser partículas de luz, siempre viajan a la velocidad de la luz. En lugar de frenarse, cuando los fotones se enfrían sus frecuencias vibracionales disminuyen, lo que significa que cambian de color. Los fotones violetas se desplazan hacia el azul, luego hacia el verde, el amarillo, el rojo, y luego al infrarrojo (como los que se hacen visibles con visores nocturnos), a las microondas (como las que calientan la comida al rebotar en las paredes de su horno microondas), y finalmente al dominio de las radiofrecuencias.

Tal como Gamow fue el primero en advertir y tal como Alpher y su colaborador Robert Hermann desarrollaron con gran fidelidad, todo esto significa que si la teoría del big bang es correcta, entonces el espacio debería estar ahora lleno en todas partes *de fotones remanentes del suceso de la creación*, que fluyen en todas direcciones, cuyas frecuencias vibracionales están determinadas por cuánto se ha expandido y enfriado el universo durante los miles de millones de años desde que quedaron liberados. Los cálculos matemáticos detallados mostraron que los fotones deberían haberse enfriado hasta cerca del cero absoluto, lo que llevó sus frecuencias a la región de microondas del espectro. Por esta razón, se les llama *radiación cósmica de fondo de microondas*.

Recientemente releí los artículos de Gamow, Alpher y Hermann que a finales de los años cuarenta anunciaban y explicaban estas conclusiones. Son prodigios de física teórica. Los análisis técnicos apenas requieren una formación de física a nivel de grado, y pese a todo los resultados son profundos. Los autores concluían que todos estamos inmersos en un baño de fotones, una reliquia cósmica que nos ha legado el ardiente nacimiento del universo.

Con estos antecedentes, quizá encuentre usted sorprendente que los artículos fueran ignorados. Esto se debe fundamentalmente a que fueron escritos durante una época dominada por la física cuántica y la física nuclear. La cosmología aún no se había establecido como una ciencia cuantitativa, de modo que la comunidad de la física era menos receptiva a lo que parecían estudios teóricos marginales. Hasta cierto punto, los artículos languidecieron también debido al inusual estilo jocoso de Gamow (en cierta ocasión modificó la autoría de un artículo que estaba escribiendo con Alpher para incluir a su amigo, el futuro premio Nobel, Hans Bethe, simplemente para hacer que la línea que incluía a los autores —Alpher, Bethe, Gamow— sonara como las tres primeras letras del alfabeto griego), con el resultado de que algunos físicos le tomaran menos en serio de lo que merecía. Como quiera que fuese, Gamow, Alpher y Hermann no consiguieron que nadie se interesara por sus resultados, y mucho menos persuadir a los astrónomos para que dedicaran un esfuerzo importante a detectar la radiación reliquia que predecían. Los artículos fueron rápidamente olvidados.

A principios de los años sesenta, sin ser conscientes del trabajo anterior, los físicos de Princeton Robert Dicke y Jim Peebles siguieron un camino similar y también se dieron cuenta de que el legado del big bang debería de ser la presencia de una radiación de fondo ubicua que llenaba el espacio.[22] Sin embargo, a diferencia de los miembros del equipo de Gamow, Dicke era

un reputado físico experimental, y por eso no necesitaba convencer a nadie para buscar la radiación por observación. Podía hacerlo él mismo. Junto con sus estudiantes David Wilkinson y Peter Roll, Dicke ideó un esquema experimental para captar algunos de los fotones vestigios del big bang. Pero antes de que los investigadores de Princeton pudieran poner a prueba su plan, recibieron una de las más famosas llamadas telefónicas de la historia de la ciencia.

Mientras Dicke y Peebles habían estado calculando, los físicos Arno Penzias y Robert Wilson en Bell Labs, a menos de cincuenta kilómetros de Princeton, habían estado luchando con una antena de radiocomunicaciones (casualmente, estaba basada en un diseño al que había llegado Dicke en los años cuarenta). Por muchos ajustes que hicieran, la antena daba un inevitable ruido de fondo en forma de pitido continuo. Penzias y Wilson estaban convencidos de que algo funcionaba mal en su aparato. Pero entonces llegó una fortuita cadena de conversaciones. Empezó con una charla que dio Peebles en febrero de 1965 en la Universidad Johns Hopkins, a la que asistió el radioastrónomo Kenneth Turner, del Instituto Carnegie, quien comentó los resultados que había presentado Peebles a su colega del MIT Bernard Burke, quien casualmente había estado en contacto con Penzias en los Bell Labs. Al saber de la investigación de Princeton, el equipo de los Bell Labs comprendió que su antena estaba pitando por una buena razón: *estaba recogiendo la radiación cósmica de fondo de microondas*. Penzias y Wilson llamaron a Dicke, quien rápidamente les confirmó que ellos habían dado sin querer con la reverberación del big bang.

Los dos grupos acordaron publicar sus artículos simultáneamente en el prestigioso *Astrophysical Journal*. El grupo de Princeton discutió su teoría del origen cosmológico de la radiación de fondo, mientras que el equipo de los Bell Labs informó, en un lenguaje más conservador y sin hacer mención a la cosmología,

de la detección de una radiación de microondas uniforme que permeaba el espacio. Ninguno de los dos artículos mencionaba el trabajo anterior de Gamow, Alpher y Hermann. Por su descubrimiento, Penzias y Wilson fueron galardonados en 1978 con el premio Nobel de Física.

Gamow, Alpher y Hermann quedaron profundamente disgustados, y en los años que siguieron se esforzaron en que se reconociera su trabajo. Sólo de forma gradual y con retraso saludó la comunidad física su papel primario en este descubrimiento trascendental.

La misteriosa uniformidad de los fotones antiguos

Durante las décadas transcurridas desde que se observara por primera vez, la radiación cósmica de fondo de microondas se ha convertido en una herramienta crucial en las investigaciones cosmológicas. La razón está clara. En muchos campos, los investigadores darían cualquier cosa por tener una visión directa y sin trabas del pasado. En su lugar, generalmente tienen que componer una visión de las condiciones remotas basada en residuos: fósiles alterados por la meteorología, pergaminos en descomposición o restos momificados. La cosmología es el único campo en el que realmente podemos ser testigos de la historia. Los puntos de luz estelar que podemos ver a simple vista son chorros de fotones que han estado viajando hacia nosotros durante años o durante miles de años. La luz procedente de objetos más lejanos, captada por potentes telescopios, ha estado viajando hacia nosotros durante mucho más tiempo, a veces durante miles de millones de años. Cuando usted mira esa luz tan antigua, está viendo —literalmente— tiempos antiguos.

Aquellas idas y venidas primordiales ocurrían lejos, pero la aparente uniformidad a gran escala del universo es un fuerte argumento a favor de que lo que estaba sucediendo allí también estaba sucediendo, en promedio, aquí. Al mirar hacia arriba, estamos mirando hacia atrás.

Los fotones cósmicos de microondas nos permiten aprovechar al máximo esta oportunidad. Por mucho que mejore la tecnología, los fotones de microondas son los más viejos que cabe esperar que veamos, porque sus hermanos mayores quedaron atrapados por las condiciones neblinosas que dominaron durante eras anteriores. Cuando examinamos los fotones del fondo cósmico de microondas, estamos atisbando cómo eran las cosas hace casi catorce mil millones de años.

Los cálculos muestran que hoy hay unos cuatrocientos millones de estos fotones cósmicos de microondas atravesando cada metro cúbico de espacio. Aunque nuestros ojos no puedan verlos, un televisor viejo puede hacerlo. Aproximadamente un 1 por 100 de la nieve en una pantalla de un televisor que no esté conectado a una antena y esté sintonizado a una emisora que ha dejado de emitir se debe a la recepción de fotones del big bang. Es una idea curiosa. Las mismas ondas que transmiten reposiciones de *Todo en casa* y los *Honeymooners*[23] llevan algunos de los más viejos fósiles del universo, fotones que comunican un drama que se representó cuando el cosmos sólo tenía unos pocos cientos de miles de años.

La predicción correcta que hacía el modelo del big bang de que el espacio debería estar lleno de radiación de fondo de microondas fue un triunfo. Durante tan sólo trescientos años de pensamiento científico y progreso tecnológico, nuestra especie pasó de observar a través de telescopios rudimentarios y dejar caer bolas desde torres inclinadas a captar procesos físicos en acción inmediatamente después de que el universo hubiera nacido. Sin embargo, una posterior investigación de los datos

planteó una dificultad. Medidas cada vez más refinadas de la temperatura de la radiación, hechas no con receptores de televisión sino con algunos de los equipos astronómicos más precisos nunca construidos, mostraron que —sorprendentemente— la radiación era completamente uniforme en todo el espacio. A cualquier punto hacia el que se dirija el detector, la temperatura es 2,725 grados sobre el cero absoluto. El enigma consiste en explicar cómo puede darse una uniformidad tan fantástica.

Dadas las ideas presentadas en el capítulo 2 (y mi comentario cuatro párrafos antes), puedo imaginarle diciendo: «Bien, ése es precisamente el principio cosmológico en acción: ningún lugar en el universo es especial comparado con cualquier otro, de modo que la temperatura debería ser la misma en todos». Muy bien. Pero recuerde que el principio cosmológico era una hipótesis simplificadora que los físicos, Einstein incluido, utilizaban para hacer tratable el análisis matemático de la evolución del universo. Puesto que la radiación de fondo de microondas es realmente uniforme a lo largo del espacio, proporciona una prueba observacional convincente del principio cosmológico, y refuerza nuestra confianza en las conclusiones que el principio cosmológico ayudó a revelar. Pero la sorprendente uniformidad de la radiación pone el foco de atención sobre el propio principio cosmológico. Por razonable que pueda sonar el principio cosmológico, ¿qué mecanismo estableció la uniformidad a escala cósmica que confirman las observaciones?

Más rápido que la velocidad de la luz

Todos hemos tenido la sensación algo incómoda de estrechar la mano de alguien y encontrarla caliente (no tan malo) o

fría y sudorosa (decididamente peor). Pero si usted mantuviera sujeta esa mano, encontraría que la modesta diferencia de temperaturas rápidamente disminuiría. Cuando los objetos están en contacto, el calor migra del más caliente al más frío, hasta que sus temperaturas se igualan. Usted experimenta esto continuamente. Ésa es la razón por la que el café que deja en su mesa llega finalmente a la temperatura ambiente.

Parece que un razonamiento similar explicaría la uniformidad de la radiación de fondo de microondas. Como sucede con las manos estrechadas y el café sin tocar, la uniformidad refleja presumiblemente la familiar tendencia de un ambiente hacia una temperatura global común. La única novedad del proceso es que se supone que la tendencia ha tenido lugar sobre distancias cósmicas.

Sin embargo, esta explicación falla en la teoría del big bang.

Para que los lugares o las cosas lleguen a una temperatura común, una condición esencial es el contacto mutuo. Puede ser directo, como al estrechar las manos, o mínimo, a través de un intercambio de información de modo que las condiciones en distintas localizaciones puedan quedar correlacionadas. Sólo mediante dicha influencia mutua puede alcanzarse un ambiente común compartido. Un termo está diseñado para impedir tales interacciones, lo que evita el impulso hacia la uniformidad y conserva las diferencias de temperatura.

Esta simple observación ilustra el problema que se plantea con la ingenua explicación de la uniformidad de la temperatura cósmica. Localizaciones en el espacio que están muy separadas —digamos, un punto a su derecha, tan profundo en el cielo nocturno que la primera luz que emitió acaba de llegarle a usted, y un segundo punto similar pero a su izquierda— nunca han interaccionado. Aunque usted puede verlos a ambos, la luz procedente de uno de ellos aún tiene que cubrir una enorme

distancia antes de llegar al otro. Así pues, observadores hipotéticos situados en los lejanos lugares izquierdo y derecho aún tienen que verse uno a otro, y puesto que la velocidad de la luz fija un límite superior a la rapidez con que puede viajar cualquier cosa, aún no han interaccionado de ninguna manera. Para utilizar el lenguaje del capítulo anterior, cada uno está más allá del horizonte cósmico del otro.

Esta descripción hace evidente el misterio. Usted estaría perplejo si los habitantes de esos lugares distantes hablaran el mismo lenguaje y tuvieran bibliotecas llenas con los mismos libros. Sin contacto, ¿cómo podría haberse establecido una herencia común? Igualmente perplejo debería estar al saber que, sin ningún contacto aparente, estas regiones ampliamente separadas comparten una temperatura común, una temperatura que coincide con una precisión mejor que cuatro cifras decimales.

Hace años, cuando conocí por primera vez este enigma, yo *estaba* perplejo. Pero tras pensar más en ello, quedé intrigado por el enigma. ¿Cómo es posible que dos objetos que habían estado juntos en un tiempo —como creemos que estuvieron todas las cosas del universo en el momento del big bang— se hayan separado tan rápidamente que la luz emitida por uno no hubiera tenido tiempo de llegar al otro? La luz fija el límite de velocidad cósmica, así que ¿cómo podían los objetos llegar a tener una separación espacial mayor que la que la luz habría atravesado en ese tiempo?

La respuesta ilumina un punto que no se suele abordar de la forma adecuada. La velocidad límite que fija la luz se refiere solamente al movimiento de objetos a través del espacio. Pero las galaxias se alejan unas de otras no porque estén viajando a través del espacio —las galaxias no tienen motores de reacción—, sino más bien porque el propio espacio se está dilatando y las galaxias están siendo arrastradas por el flujo global.[24] Y el caso es que la relatividad no pone límites a la rapidez con que puede

dilatarse el espacio, de modo que no hay límite a la rapidez con la que las galaxias que están siendo separadas por la dilatación se alejan unas de otras. La velocidad de recesión entre dos galaxias cualesquiera puede superar cualquier velocidad, incluida la velocidad de la luz.

De hecho, las matemáticas de la relatividad general muestran que en los primeros instantes del universo el espacio se habría dilatado tan rápidamente que las regiones se habrían separado a una velocidad mayor que la de la luz. Como resultado, habrían sido incapaces de ejercer ninguna influencia unas sobre otras. La dificultad está entonces en explicar cómo se establecieron temperaturas casi idénticas en dominios cósmicos independientes, un enigma al que los cosmólogos han llamado el *problema del horizonte*.

Ampliando horizontes

En 1979, Alan Guth (que entonces trabajaba en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford) dio con una idea que, con posteriores refinamientos críticos por parte de Andrei Linde (entonces investigador en el Instituto de Física Lebedev en Moscú), y Paul Steinhardt y Andreas Albrecht (un dúo profesor-estudiante que entonces trabajaba en la Universidad de Pensilvania), es ampliamente aceptada como solución al problema del horizonte. Esta solución, la *cosmología inflacionaria*, se basa en algunas características sutiles de la relatividad general de Einstein que describiré enseguida, pero sus líneas generales pueden resumirse fácilmente.

El problema del horizonte aqueja a la teoría del big bang estándar porque las regiones del espacio se separan con demasia-

da rapidez para que se establezca el equilibrio térmico. La teoría inflacionaria resuelve el problema reduciendo la velocidad con la que las regiones se estaban separando en los primeros momentos, lo que les da tiempo más que suficiente para llegar a la misma temperatura. La teoría propone entonces que después de completar este «estrechamiento de manos cósmico» hubo un breve brote de expansión enormemente rápida y a un ritmo cada vez mayor —llamada *expansión inflacionaria*— que compensó con creces la lenta salida, impulsando rápidamente las regiones hasta posiciones enormemente distantes en el cielo. Las condiciones uniformes que observamos ya no plantean un misterio, puesto que se estableció una temperatura común antes de que las regiones fueran rápidamente separadas.[25] A grandes rasgos, ésta es la esencia de la propuesta inflacionaria.[26]

Hay que tener en mente, no obstante, que los físicos no dictan cómo se expande el universo. Hasta donde podemos decir a partir de nuestras más refinadas observaciones, son las ecuaciones de la relatividad general de Einstein las que lo hacen. La viabilidad del escenario inflacionario depende por ello de si la modificación que propone a la expansión big bang estándar puede emerger de las matemáticas de Einstein. A primera vista, esto no es ni mucho menos obvio.

Por ejemplo, estoy totalmente seguro de que si usted tuviera que poner al día a Newton dándole un curso de cinco minutos sobre relatividad general, explicándole las líneas generales del espacio curvo y el universo en expansión, él encontraría absurda su posterior descripción de la propuesta inflacionaria. Newton se mantendría firme en que, independientemente de las fantásticas matemáticas y el extraño lenguaje einsteniano, la gravedad sigue siendo una fuerza atractiva. Y por ello, resaltaría él con un puñetazo en la mesa, la gravedad actúa acercando los objetos y frenando cualquier divergencia cósmica. Una expansión que empieza despacio y luego se acelera bruscamente du-

rante un breve período podría resolver el problema del horizonte, pero es una ficción. Newton diría que igual que la atracción gravitatoria implica que la velocidad de una pelota de béisbol bateada decrece a medida que la bola asciende, también implica que la expansión cósmica debe frenarse con el tiempo. Por supuesto, si la expansión se reduce hasta cero y luego se convierte en una contracción cósmica, la implosión puede acelerarse con el tiempo, igual que la velocidad de la pelota puede aumentar cuando empieza su trayectoria descendente. Pero la velocidad de la expansión espacial no puede aumentar.

Newton está cometiendo un error, pero usted no puede culparle por esto. La culpa está en el apresurado resumen de la relatividad general que usted le ha hecho. No me malinterprete. Es comprensible que, con sólo cinco minutos (uno de ellos dedicado a explicar el béisbol), usted se centrara en el espaciotiempo curvo como la fuente de la gravedad. El propio Newton había llamado la atención sobre el hecho de que no había ningún mecanismo conocido para transmitir la gravedad, y él siempre vio eso como una laguna en su propia teoría. Naturalmente, usted quería mostrarle la solución de Einstein. Pero la teoría de la gravedad de Einstein hizo mucho más que simplemente llenar una laguna en la física newtoniana. La gravedad en la relatividad general difiere en su esencia de la gravedad en la física newtoniana, y en el presente contexto hay una característica que reclama un énfasis.

En la teoría de Newton, la gravedad viene solamente de la masa de un objeto. Cuanto mayor es la masa, mayor es el tirón gravitatorio del objeto. En la teoría de Einstein, la gravedad viene de la masa (y energía) de un objeto, *pero también de su presión*. Pese una bolsa cerrada de patatas fritas. Pésela de nuevo, pero esta vez estruje la bolsa de modo que el aire en su interior esté sometido a una presión mayor. Según Newton, el peso será el mismo, porque no ha habido cambio en la masa. Según Eins-

tein, la bolsa comprimida pesará un poco más porque, aunque la masa es la misma, ha habido un aumento de la presión.[27] En circunstancias cotidianas no somos conscientes de ello, porque para objetos ordinarios el efecto es fantásticamente minúsculo. Incluso así, la relatividad general, y los experimentos que la han mostrado correcta, deja perfectamente claro que la presión contribuye a la gravedad.

Esta desviación de la teoría de Newton es crítica. La presión del aire, ya sea el aire en una bolsa de patatas fritas, en un globo inflado o en la habitación en donde usted está leyendo ahora, es positiva, lo que significa que el aire empuja hacia fuera. En relatividad general, la presión positiva, como la masa positiva, contribuye a la gravedad de forma positiva, lo que da como resultado un aumento en el peso. Pero mientras que la masa es siempre positiva, hay situaciones en las que la presión puede ser negativa. Pensemos en una banda elástica estirada. Más que empujar hacia fuera, las moléculas tirantes de la banda elástica tiran hacia dentro, ejerciendo lo que los físicos llaman *presión negativa* (o, de forma equivalente, *tensión*). E igual que la relatividad general muestra que la presión positiva da lugar a gravedad atractiva, también muestra que la presión negativa da lugar a lo contrario: *gravedad repulsiva.*

¿*Gravedad repulsiva*?

Esto haría estallar la mente de Newton. Para él, la gravedad era sólo atractiva. Pero la mente de usted debería quedar intacta: ya ha encontrado esta cláusula extraña en el contrato de la relatividad general con la gravedad. ¿Recuerda la constante cosmológica de Einstein, discutida en el capítulo anterior? Allí afirmé que al infundir una energía uniforme en el espacio, una constante cosmológica genera gravedad repulsiva. Pero en ese encuentro previo no expliqué por qué sucede esto. Ahora puedo hacerlo. Una constante cosmológica no sólo dota al tejido del espacio con una energía uniforme determinada por el valor

de la constante (el número en la tercera línea de la apócrifa declaración de renta de la relatividad), sino que también llena el espacio con una presión negativa uniforme (veremos por qué en un momento). Y, como antes, cuando se trata de la fuerza gravitatoria que cada una produce, la presión negativa hace lo contrario que la masa positiva y la presión positiva. Produce gravedad repulsiva.[28]

En las manos de Einstein, la gravedad repulsiva fue utilizada con un único propósito equivocado. Propuso ajustar muy bien la cantidad de presión negativa que permea el espacio para garantizar que la gravedad repulsiva producida contrarrestara exactamente la gravedad atractiva ejercida por los contenidos materiales más familiares del universo, lo que da un universo estático. Como hemos visto, él renunció posteriormente a esta jugada. Seis décadas después, quienes desarrollaron la teoría inflacionaria proponían un tipo de gravedad repulsiva que difería de la versión de Einstein tanto como el final de la *Octava sinfonía* de Mahler difiere del zumbido de un diapasón. Más que un moderado y continuo empuje hacia fuera que estabilizara el universo, la teoría inflacionaria concibe un gigantesco impulso de gravedad repulsiva que es asombrosamente corto y tormentosamente intenso. Las regiones del espacio tuvieron mucho tiempo antes del brote expansivo para llegar a la misma temperatura, pero luego, a caballo de la ola, cubrieron las grandes distancias necesarias para alcanzar sus posiciones observadas en el cielo.

Llegado este punto, seguramente Newton le lanzaría otra mirada desaprobadora. Siempre escéptico, él encontraría otro problema en su explicación. Después de hacerse con los detalles más intrincados de la relatividad general al hojear rápidamente uno de los libros de texto estándar, él aceptaría el hecho extraño de que la gravedad puede ser repulsiva en teoría. Pero, preguntaría, ¿qué es todo eso de la presión negativa que permea el

espacio? Una cosa es utilizar el tirón hacia dentro de una banda elástica estirada como un ejemplo de presión negativa, y otra es argumentar que hace miles de millones de años, más o menos en el instante del big bang, el espacio estaba momentáneamente permeado por una enorme y uniforme presión negativa. ¿Qué cosa, o qué proceso, o qué entidad tiene la capacidad de suministrar una presión negativa tan fugaz pero ubicua?

El genio de los pioneros de la inflación iba a ofrecer una respuesta. Ellos demostraron que la presión negativa requerida para un brote de antigravedad emerge de forma natural de un nuevo mecanismo que incluye ingredientes conocidos como *campos cuánticos*. En el caso de nuestra historia, los detalles son cruciales, porque la manera en que resulta la expansión es central para la versión de los universos paralelos a que da lugar.

Campos cuánticos

En los días de Newton la física se interesaba en el movimiento de los objetos que uno puede ver —piedras, proyectiles de artillería, planetas—, y las ecuaciones que él desarrolló reflejaban muy bien este centro de interés. Las leyes de movimiento de Newton son una encarnación matemática de cómo se mueven cuerpos tan tangibles cuando son empujados, atraídos o lanzados al aire. Durante más de un siglo, éste fue un enfoque maravillosamente fructífero. Pero a comienzos del siglo XIX, el científico inglés Michael Faraday inició una trasformación en el pensamiento con el escurridizo pero demostrablemente poderoso concepto de *campo*.

Tome un potente imán de nevera y colóquelo dos centímetros por encima de un clip. Usted sabe lo que sucede. El clip

salta y se pega a la superficie del imán. Esta demostración es tan tópica, tan familiar, que es fácil pasar por alto lo extraña que es. Sin tocar el clip, el imán puede hacer que se mueva. ¿Cómo es posible? ¿Cómo puede ejercerse una influencia en ausencia de cualquier contacto con el clip? Estas y muchas consideraciones relacionadas llevaron a Faraday a postular que aunque el imán no toca al clip, produce algo que *sí* lo hace. Ese algo es lo que Faraday llamó un *campo magnético*.

Nosotros no podemos ver los campos producidos por los imanes; no podemos oírlos; ninguno de nuestros sentidos es sensible a ellos. Pero eso simplemente refleja limitaciones fisiológicas. Así como una llama genera calor, también un imán genera un campo magnético. Estando más allá del contorno físico del imán sólido, el campo de un imán es una «niebla» o «esencia» que llena el espacio y da poder al imán.

Los campos magnéticos son sólo un tipo de campo. Las partículas cargadas dan lugar a otro tipo: los campos eléctricos, tales como los responsables de la sacudida que usted recibe a veces cuando agarra el pomo metálico en la puerta de una habitación enmoquetada. De forma inesperada, los experimentos de Faraday mostraron que los campos eléctrico y magnético están íntimamente relacionados: él encontró que un campo eléctrico variable genera un campo magnético, y viceversa. En la segunda mitad del siglo XIX, James Clerk Maxwell dio forma matemática a estas ideas, describiendo los campos eléctrico y magnético en términos de números asignados a cada punto en el espacio; los valores de los números reflejan la capacidad del campo, en esa localización, para ejercer influencia. Lugares en el espacio donde los valores numéricos del campo magnético son altos, por ejemplo en una cavidad de un aparato de imagen por resonancia magnética (MRI), son lugares donde los objetos metálicos sentirían un fuerte tirón o empuje. Lugares en el espacio donde los valores numéricos del campo eléctrico son al-

tos, por ejemplo en el interior de una nube de tormenta, son lugares donde pueden ocurrir potentes descargas eléctricas tales como un relámpago.

Maxwell descubrió ecuaciones, que ahora llevan su nombre, que gobiernan cómo varía la intensidad de los campos eléctrico y magnético de un punto a otro en el espacio y de un instante a otro en el tiempo. Estas mismas ecuaciones gobiernan el mar de campos eléctricos y magnéticos rizados, denominado *ondas electromagnéticas*, dentro del cual estamos todos inmersos. Encienda un teléfono móvil, una radio, o un computador inalámbrico, y las señales recibidas representan una porción minúscula de la maraña de transmisiones electromagnéticas que le atraviesan silenciosamente cada segundo. Y lo más sorprendente de todo: las ecuaciones de Maxwell revelaron que la propia luz visible es una onda electromagnética, una onda que podemos ver porque la evolución ha preparado nuestros ojos para ello.

En la segunda mitad del siglo XX, los físicos unificaron el concepto de campo con su creciente comprensión del micromundo compendiada por la mecánica cuántica. El resultado, la *teoría cuántica de campos* proporciona un marco matemático para nuestras más refinadas teorías de la materia y las fuerzas de la naturaleza. Utilizándola, los físicos han establecido que, además de los campos eléctrico y magnético, existe toda una panoplia de otros campos con nombres tales como *campos nucleares fuerte y débil* y *campos de electrones, quarks* y *neutrinos*. Un campo que hasta la fecha sigue siendo puramente hipotético, el *campo inflatón*, proporciona una base teórica para la cosmología inflacionaria. [29]

Campos cuánticos e inflación

Los campos portan energía. Cualitativamente lo sabemos porque los campos realizan tareas que requieren energía, como hacer que se muevan objetos (tales como clips). Cuantitativamente, las ecuaciones de la teoría cuántica de campos nos muestran cómo, dado el valor numérico de un campo en una localización concreta, se puede calcular la cantidad de energía que contiene. Normalmente, cuanto mayor es el valor, mayor es la energía. El valor de un campo puede variar de un lugar a otro, pero si fuera constante, si tomara el mismo valor en todas partes, llenaría el espacio con la misma energía en cada punto. La idea crítica de Guth fue que tales configuraciones de campo uniformes llenan el espacio no sólo con energía uniforme, sino también con presión negativa uniforme. Y con ello, *él encontró un mecanismo físico para generar gravedad repulsiva*.

Para ver por qué un campo uniforme da presión negativa, pensemos primero en una situación más ordinaria que incluye presión positiva: la apertura de una botella de Dom Pérignon. Cuando usted saca lentamente el corcho, puede sentir la presión positiva del dióxido de carbono del champán que empuja hacia fuera, impulsando el corcho desde la botella hacia su mano. Un hecho que usted puede verificar directamente es que esta fuerza hacia fuera drena un poco de energía del champán. ¿Ve usted esos zarcillos de vapor cerca del cuello de la botella cuando el corcho ha salido? Se forman porque la energía que consume el champán al empujar el corcho produce una caída en la temperatura que, como sucede con su aliento en un frío día de invierno, hace que el vapor de agua ambiente se condense.

Imaginemos ahora que se reemplaza el champán por algo menos festivo pero más pedagógico: un campo cuyo valor es uniforme a lo largo de la botella. Ahora, cuando usted quite el corcho experimentará algo muy diferente. A medida que desliza el corcho hacia fuera, deja un pequeño volumen extra dentro

de la botella disponible para que el campo lo permee. Puesto que un campo uniforme aporta la misma energía en cada localización, cuanto mayor es el volumen que llena el campo, mayor es la energía total que contiene la botella. Lo que significa que, a diferencia de lo que ocurre con el champán, el acto de quitar el corcho añade energía a la botella.

¿Cómo podría ser? ¿De dónde vendría la energía? Bien, piense en lo que sucede si los contenidos de la botella, en lugar de empujar el corcho hacia fuera, *tiran del corcho hacia dentro*. Esto requeriría que usted tirara del corcho para sacarlo, un esfuerzo que a su vez transferiría energía de sus músculos a los contenidos de la botella. Para explicar el aumento en la energía de la botella concluimos entonces que, a diferencia del champán, que empuja hacia fuera, un campo uniforme succiona hacia dentro. Eso es lo que entendemos al decir que un campo uniforme produce una presión negativa, y no positiva.

Aunque no hay ningún sumiller que descorche el cosmos, es válida la misma conclusión: si hay un campo —el hipotético campo inflatón— que tiene un valor uniforme a lo largo de una región del espacio, llenará dicha región no sólo con energía sino también con presión negativa. Y, como es ahora familiar, tal presión negativa produce gravedad repulsiva, que impulsa una expansión del espacio cada vez más rápida. Cuando Guth introdujo en las ecuaciones de Einstein los valores numéricos probables para la energía y presión del inflatón en consonancia con el ambiente extremo del universo primitivo, las matemáticas revelaron que la resultante gravedad repulsiva sería enorme. Fácilmente sería muchos órdenes de magnitud más intensa que la fuerza repulsiva que Einstein concibió años antes cuando flirteaba con la constante cosmológica, e impulsaría un espectacular estiramiento espacial. Sólo esto ya era excitante. Pero Guth se dio cuenta de que había un premio adicional inevitable.

El mismo razonamiento que explica por qué un campo uniforme tiene presión negativa se aplica también a una constante cosmológica. (Si la botella contiene espacio vacío dotado con una constante cosmológica, entonces cuando usted quita lentamente el corcho, el espacio extra que deja disponible dentro de la botella aporta energía extra. La única fuente para esta energía extra es sus músculos, que por consiguiente deben haber forcejeado contra una presión negativa hacia dentro suministrada por la constante cosmológica). Y, como sucede con un campo uniforme, una presión negativa uniforme de una constante cosmológica también da gravedad repulsiva. Pero el punto vital aquí no son las similitudes *per se*, sino la forma en que difieren una constante cosmológica y un campo uniforme.

Una constante cosmológica es precisamente eso: una constante, un número fijo introducido en la tercera línea de la declaración de renta de la relatividad general que generaría hoy la misma gravedad repulsiva que hace miles de millones de años. Por el contrario, el valor de un campo puede cambiar, y generalmente lo hará. Cuando usted enciende su horno microondas, cambia el campo electromagnético que llena su interior; cuando el técnico activa el interruptor de un aparato MRI, cambia el campo electromagnético que atraviesa la cavidad. Guth se dio cuenta de que un campo inflatón que llenara el espacio podría comportarse de un modo similar —encendiendo un brote y luego apagándolo—, lo que permitiría que la gravedad repulsiva actúe solo durante una breve ventana de tiempo. Eso es esencial. Las observaciones establecen que si sucedió el rápido crecimiento del espacio, debió de haber sucedido hace miles de millones de años y luego se frenó abruptamente hasta llegar a la expansión más sosegada que evidencian las medidas astronómicas detalladas. Por eso, una característica sumamente importante de la propuesta inflacionaria es que la era de potente gravedad repulsiva es transitoria.

El mecanismo para encender y luego apagar el brote inflacionario se basa en la física que desarrolló inicialmente Guth pero que Linde, y Albrecht y Steinhardt, refinaron sustancialmente. Para hacerse una idea de su propuesta, piense en una bola —mejor aún, piense en un casi redondo Eric Cartman,[30] en equilibrio precario en la cima de una de las montañas cubiertas de nieve de South Park. Un físico diría que debido a su posición, Cartman contiene energía. Más exactamente, contiene *energía potencial*, lo que significa que tiene energía acumulada que está lista para ser aprovechada, de forma muy fácil si cae rodando, lo que transformaría la energía potencial en energía de movimiento (*energía cinética*). La experiencia atestigua, y las leyes de la física precisan, que esto es lo normal. Un sistema que contiene energía potencial aprovechará cualquier oportunidad para liberar dicha energía. En pocas palabras, las cosas caen.

La energía que lleva un campo de valor no nulo es también energía potencial: también puede ser aprovechada, lo que da como resultado una incisiva analogía con Cartman. Del mismo modo que el aumento en la energía potencial de Cartman cuando sube a la montaña está determinado por la forma de la pendiente —en las regiones más planas su energía potencial varía mínimamente cuando camina, porque apenas asciende, mientras que en las regiones con más pendiente su energía potencial aumenta rápidamente—, la energía potencial de un campo está descrita por una forma análoga, llamada *curva de energía potencial*. Una curva semejante, como en la Figura 3.1, determina cómo varía la energía potencial de un campo con su valor.

Siguiendo a los pioneros de la inflación, imaginémonos que en los primeros momentos del cosmos el espacio está lleno uniformemente con un campo inflatón, cuyo valor lo sitúa en lo alto de su curva de energía potencial. Imaginemos además, nos dicen estos físicos, que la curva de energía potencial se nivela para dar una suave meseta (como en la Figura 3.1), lo que

permite que el campo inflatón pase más tiempo cerca de la cima. En estas condiciones hipotéticas, ¿qué sucederá?

Dos cosas, ambas críticas. Mientras el inflatón está en la meseta, llena el espacio con una gran energía potencial y presión negativa, lo que impulsa un brote de expansión inflacionaria. Pero, así como Cartman libera su energía potencial rodando pendiente abajo, también el campo inflatón libera su energía potencial haciendo rodar su valor, a lo largo del espacio, hasta números menores. Y cuando su valor decrece, la energía y la presión negativa que alberga se disipan, poniendo fin al período de rápida expansión. Igualmente importante, la energía liberada por el campo inflatón no se pierde; así como el vapor contenido en un recipiente que se enfría se condensa en gotas de agua, la energía del inflatón se condensa en un baño uniforme de partículas que llenan el espacio. Este proceso en dos pasos —expansión breve pero rápida, seguida de conversión de energía en partículas— da como resultado una enorme y uniforme extensión espacial llena con el material bruto de estructuras familiares como estrellas y galaxias.

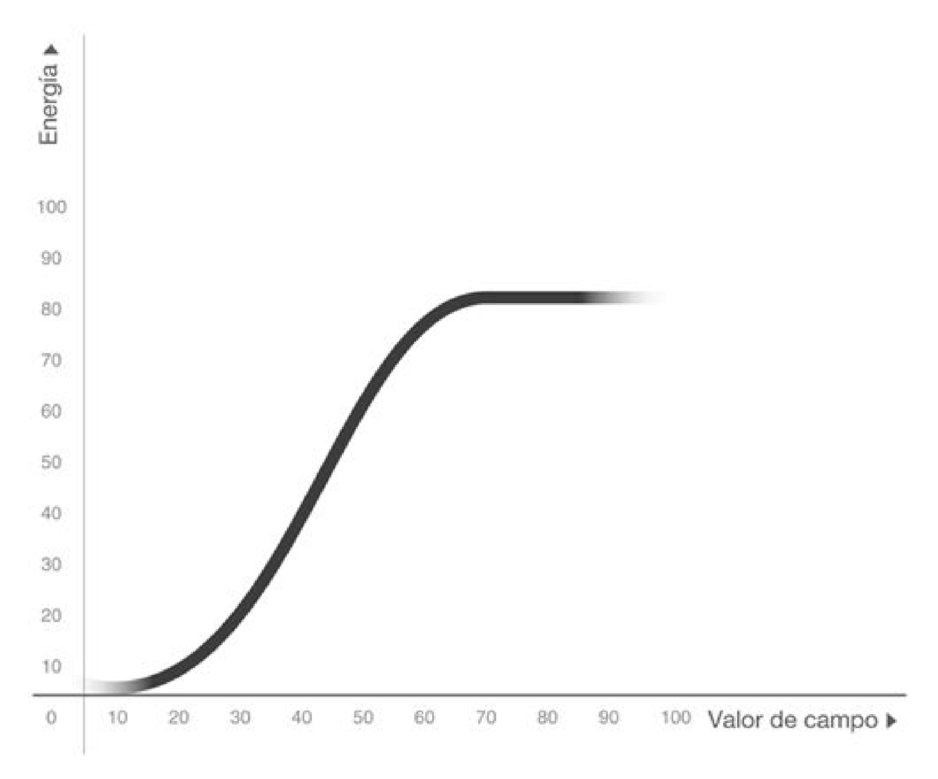


FIGURA 3.1. La energía contenida en un campo inflatón (eje vertical) para valores dados del campo (eje horizontal).

Los detalles precisos dependen de factores que ni la teoría ni la observación han determinado hasta ahora (el valor inicial del campo inflatón, la forma exacta de la pendiente de la energía potencial y demás),[31] pero en versiones típicas los cálculos matemáticos muestran que la energía del inflatón rodaría pendiente abajo en una minúscula fracción de segundo, del orden de 10^{-35} segundos. Y pese a ello, durante ese breve período de tiempo el espacio se expandiría en un factor colosal, quizá 10^{30}, si no más. Estos números son tan extremos que desafían las analogías. Implican que una región del espacio del tamaño de un guisante se estiraría hasta un tamaño mayor que el universo observable en un intervalo de tiempo tan corto que un parpadeo lo superaría en un factor de mil billones de trillones.

Por difícil que sea imaginar una escala semejante, lo que es esencial es que la región del espacio que abarcaba el universo observable era tan pequeña que fácilmente habría llegado a una temperatura uniforme antes de que el rápido brote la estirara hasta convertirla en nuestra gran extensión cósmica. La expansión inflacionaria, y miles de millones de años de evolución cósmica posterior, dieron como resultado que esta temperatura se enfriara sustancialmente, pero la uniformidad pronto establecida dicta un resultado uniforme hoy. Esto resuelve el misterio de cómo se dieron las condiciones uniformes del universo. En la inflación, una temperatura uniforme a lo largo del espacio es inevitable.[32]

Inflación eterna

Durante las casi tres décadas transcurridas desde su descubrimiento, la inflación ha sido un pilar de la investigación cosmológica. Pero para tener una imagen precisa del panorama de la investigación, usted debería ser consciente de que la inflación es un marco cosmológico, pero no una teoría específica. Los investigadores han demostrado que hay muchas formas de llegar a la inflación, que difieren en detalles tales como el número de campos inflatón que suministra la presión negativa, las curvas concretas de energía potencial a la que está sometido cada campo y demás. Por suerte, las diversas realizaciones de la inflación tienen algunas consecuencias en común, así que podemos extraer conclusiones incluso a falta de una versión definitiva.

Entre éstas es de gran importancia una que fue plenamente advertida por primera vez por Alexander Vilenkin de la Univer-

sidad Tufts y desarrollada posteriormente por otros, incluyendo muy en especial a Linde.[33] De hecho, es la razón por la que he dedicado la primera mitad de este capítulo a explicar el marco inflacionario.

En muchas versiones de la teoría inflacionaria, el brote de expansión espacial no es un suceso único. En su lugar, el proceso por el que se formó nuestra región de universo —rápido estiramiento del espacio, seguido de una transición a una expansión más lenta y normal, junto con la producción de partículas— puede suceder una y otra vez en varias localizaciones muy remotas a lo largo del cosmos. A vista de pájaro, el cosmos aparecería agujereado con muchas regiones ampliamente separadas, cada una de ellas consecuencia de una porción de espacio que ha experimentado un brote inflacionario. Nuestro dominio, al que siempre hemos considerado *el* universo, sería entonces tan sólo una de estas numerosas regiones flotando dentro de una extensión espacial inmensamente mayor. Si existe vida inteligente en las otras regiones, sin duda esos seres pensarán también que su universo es *el* universo. Y así, la cosmología inflacionaria nos lleva directos a nuestra segunda variación sobre el tema de los universos paralelos.

Para comprender cómo se produce este *multiverso inflacionario* tenemos que ocuparnos de dos complicaciones que mi analogía con Cartman pasó por alto.

En primer lugar, la imagen de Cartman en la cima de una montaña ofrecía una analogía con un campo inflatón que albergaba alta energía potencial y presión negativa, a punto de rodar hasta valores más bajos. Pero mientras que Cartman está en la cima de una única montaña, el campo inflatón tiene un valor en *cada* punto del espacio. La teoría postula que el campo inflatón empieza con el mismo valor en cada localización dentro de una región inicial. Y por ello habríamos obtenido una versión más fiel de la ciencia si imaginamos algo un poco extraño: mu-

chos clones de Cartman en lo alto de muchas montañas idénticas y muy próximas a lo largo de una extensión espacial.

En segundo lugar, hasta ahora apenas hemos tocado el aspecto *cuántico* de la teoría cuántica de campos. El campo inflatón, como cualquier otra cosa en nuestro universo cuántico, está sujeto a la incertidumbre cuántica. Esto significa que su valor sufrirá fluctuaciones cuánticas aleatorias, aumentando momentáneamente un poco aquí y disminuyendo un poco allá. En situaciones cotidianas, las fluctuaciones cuánticas son demasiado pequeñas para ser advertidas. Pero los cálculos muestran que cuanta más energía tiene un inflatón, mayores serán las fluctuaciones que experimentará debido a la incertidumbre cuántica. Y puesto que el contenido de energía del inflatón durante el brote inflacionario era extraordinariamente alto, las fluctuaciones en el universo primitivo eran grandes y dominantes.[34]

De modo que no sólo deberíamos imaginar un pelotón de Cartmans en la cima de montañas idénticas; también deberíamos imaginar que todos ellos están sujetos a una serie aleatoria de temblores —fuertes aquí, débiles allá, muy fuertes más allá —. Con este montaje, podemos ahora determinar lo que va a suceder. Diferentes clones de Cartman seguirán en la cima de sus montañas durante tiempos diferentes. En algunos lugares, un fuerte temblor hace rodar pendiente abajo a la mayoría de los Cartmans; en otros lugares, algunos Cartmans pueden haber empezado a rodar hasta que un fuerte temblor les devuelve *arriba*. Al cabo de un tiempo, el terreno estará dividido en una colección aleatoria de dominios —igual que Estados Unidos está dividido en estados—, en algunos de los cuales no queda ningún Cartman en la cima de las montañas, mientras que en otros quedan muchos Cartman bien plantados.

La naturaleza aleatoria de las fluctuaciones cuánticas da una conclusión similar para el campo inflatón. El campo empieza alto en su pendiente de energía potencial en todos los puntos

en una región del espacio. Las fluctuaciones cuánticas actúan entonces como temblores. A causa de ello, como se ilustra en la Figura 3.2, la extensión del espacio se divide rápidamente en dominios: en unos, las fluctuaciones cuánticas hacen que el campo caiga pendiente abajo, mientras que en otros permanece en lo alto.

Hasta aquí, todo va muy bien. Pero ahora no se separe de mí; aquí es donde difieren la cosmología y Cartman. Un campo que está en lo alto de su curva de energía afecta a su entorno de forma mucho más importante que lo hace un Cartman en una situación similar. A partir de nuestro conocido estribillo —energía uniforme y presión negativa de un campo generan gravedad repulsiva— reconocemos que la región que el campo permea se expande a una velocidad fantástica. Esto significa que la evolución del campo inflatón a través del espacio está impulsada por dos procesos que se oponen. Las fluctuaciones cuánticas, que tienden a sacar el campo de su posición, *reducen* la cantidad de espacio impregnado con alta energía del campo. La expansión inflacionaria, al ampliar rápidamente aquellos dominios en los que el campo permanece firme, *aumenta* el volumen del espacio impregnado con alta energía del campo.

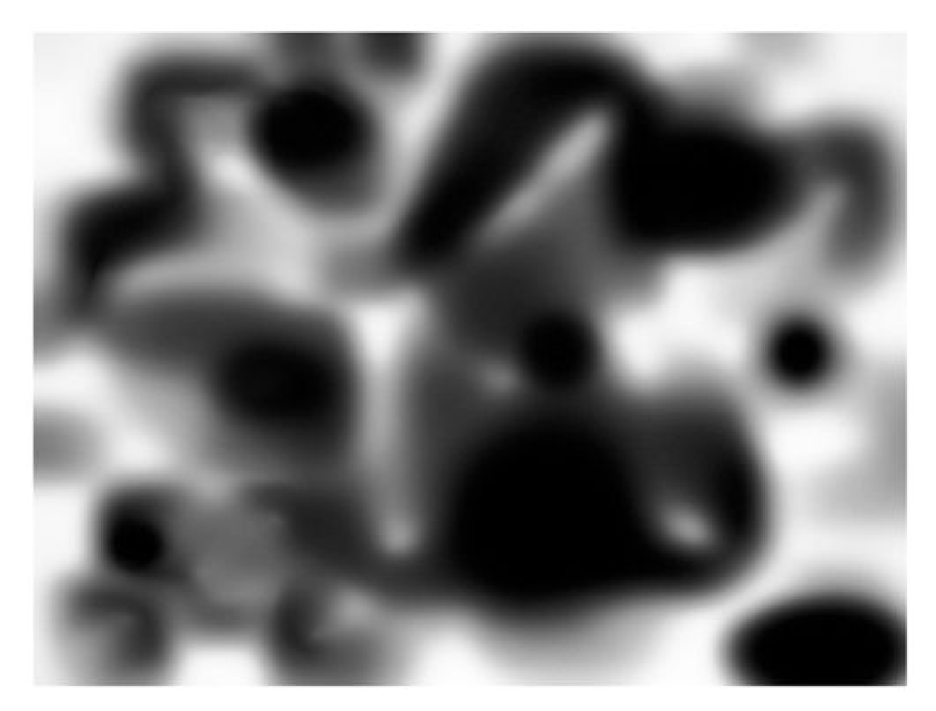


FIGURA 3.2. Diversos dominios en los que el campo inflatón ha caído por la pendiente (gris oscuro) o sigue alto (gris suave).

¿Qué proceso vence?

En la inmensa mayoría de las versiones propuestas de la cosmología inflacionaria, el aumento ocurre al menos tan rápidamente como la reducción. La razón es que un campo inflatón que puede ser sacado de su posición con demasiada rapidez genera típicamente una expansión inflacionaria demasiado pequeña para resolver el problema del horizonte; en versiones cosmológicamente satisfactorias de la inflación, el aumento vence a la reducción, lo que asegura que el volumen total del espacio en el que la energía es alta aumenta con el tiempo. Teniendo en cuenta que tales configuraciones del campo producen todavía más expansión inflacionaria, vemos que una vez que la inflación empieza, nunca termina.

Es como la difusión de una pandemia viral. Para erradicar la amenaza hay que acabar con los virus con más rapidez que con

la que pueden reproducirse. El virus inflacionario «se reproduce» —un alto valor del campo genera rápida expansión espacial y con ello infecta a un dominio aún mayor con el mismo valor alto del campo— y lo hace con demasiada rapidez para que el proceso competidor lo elimine. El virus inflacionario se resiste eficazmente a ser erradicado.[35]

El queso gruyer y el cosmos

En conjunto, estas ideas muestran que la cosmología inflacionaria lleva a una imagen completamente nueva de la extensión de la realidad, una imagen que es muy fácil de captar con una sencilla ayuda visual. Pensemos en el universo como un gigantesco queso gruyer, en el que las partes sólidas son regiones donde el valor del campo inflatón es alto y los agujeros son regiones donde es bajo. Es decir, los agujeros son regiones, como la nuestra, que han salido de la expansión super-rápida y en el proceso han convertido la energía del campo inflatón en un baño de partículas, que con el tiempo pueden unirse para dar galaxias, estrellas y planetas. En este lenguaje hemos encontrado que el queso cósmico tiene cada vez más agujeros porque los procesos cuánticos reducen el valor del inflatón en un conjunto aleatorio de localizaciones. Al mismo tiempo, las partes sólidas se hacen cada vez más grandes porque están sujetas a expansión inflacionaria impulsada por el alto valor del campo inflatón que albergan. Tomados juntos, los dos procesos dan un bloque de queso cósmico en continua expansión y cribado con un número cada vez mayor de agujeros. En el lenguaje más estándar de la cosmología, cada agujero se denomina un *universo*

burbuja (o un *universo de bolsillo*).[36] Cada uno es un claro dentro de la extensión cósmica en expansión superrápida (Figura 3.3).

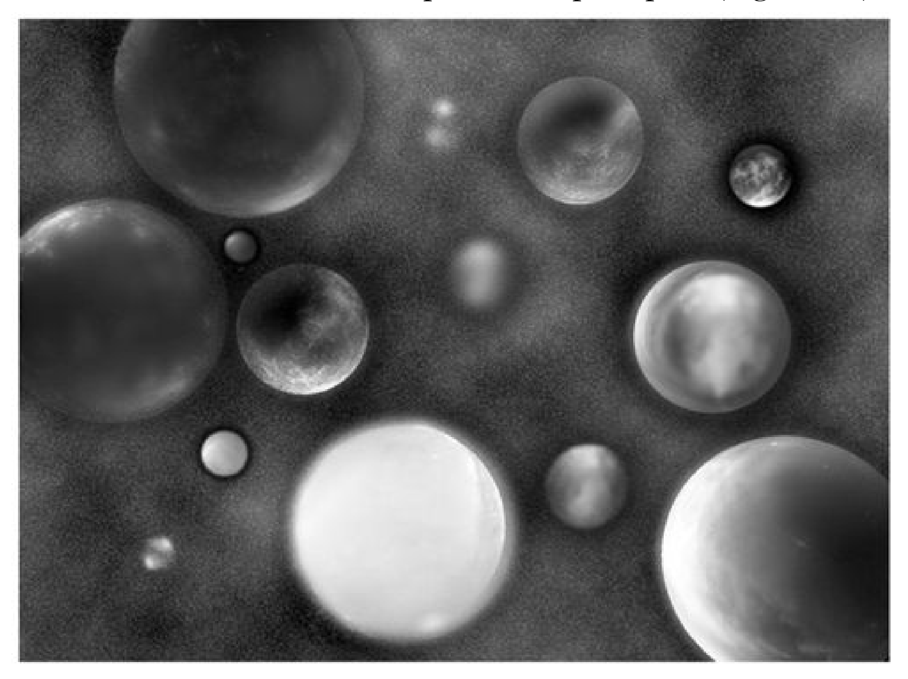


FIGURA 3.3. El multiverso inflacionario aparece cuando se forman continuamente universos burbuja dentro de un ambiente espacial en continua expansión permeado por un campo inflatón de alto valor.

No se deje engañar por la expresión descriptiva pero diminutiva «universo burbuja». Nuestro universo es gigantesco. Que tal vez sea una única región inmersa dentro de una estructura cósmica aún mayor —una única burbuja en un enorme queso cósmico— habla de la extensión fantástica, en el paradigma inflacionario, del cosmos en conjunto. Y esto vale también para otras burbujas. Cada una sería un universo —una extensión real, gigantesca y dinámica— como el nuestro.

Hay versiones de la teoría inflacionaria en las que la inflación no es eterna. Ajustando detalles tales como el número de campos inflatón y sus curvas de energía potencial, teóricos astutos

pueden disponer las cosas de modo que el inflatón sería, a su debido tiempo, desplazado de su alta posición en todas partes. Pero estas propuestas son la excepción y no la regla. Modelos inflacionarios comunes dan un número gigantesco de universos burbuja esculpidos en una extensión espacial en continua expansión. Y así, si la teoría inflacionaria es correcta, y si, como afirman muchas investigaciones teóricas, su realización físicamente relevante es eterna, la existencia de un multiverso inflacionario sería una consecuencia inevitable.

Perspectivas cambiantes

Volviendo a los años ochenta, cuando Vilenkin se dio cuenta de la naturaleza eterna de la expansión inflacionaria y los universos paralelos a que daría lugar, fue a visitar a Alan Guth en el MIT para hablarle de ello. A mitad de la explicación, Guth dio una cabezada; se había quedado dormido. Esto no era necesariamente una mala señal; Guth es famoso por dar cabezadas durante los seminarios de física —le he pillado con los ojos cerrados durante charlas que he dado—, pero entonces abre los ojos a la mitad de la exposición para hacer la pregunta más inteligente. Pero la más amplia comunidad física no era más entusiasta que Guth, de modo que Vilenkin se guardó la idea y pasó a otros proyectos.

Hoy la opinión es muy diferente. Cuando Vilenkin pensó por primera vez sobre el multiverso inflacionario, las pruebas en apoyo directo de la propia teoría inflacionaria eran débiles. Por eso, para los pocos que prestaron atención, las ideas sobre una expansión inflacionaria que produce una inmensa colección de universos paralelos parecía una especulación encima de

otra. Pero en los años transcurridos desde entonces, el argumento a favor de la inflación se ha hecho mucho más fuerte, una vez más gracias básicamente a medidas precisas de la radiación de fondo de microondas.

Incluso si la uniformidad observada de la radiación de fondo de microondas fue una de las principales motivaciones para desarrollar la teoría inflacionaria, los primeros proponentes se dieron cuenta de que la rápida expansión espacial no dejaría la radiación *perfectamente* uniforme. En su lugar, ellos argumentaron que las agitaciones mecano-cuánticas estiradas por la expansión inflacionaria deberían recubrir la uniformidad con minúsculas variaciones de temperatura, como minúsculos rizos en la superficie de un estanque por lo demás liso. Ésta ha resultado ser una idea espectacular y enormemente influyente.[37] Dice así.

La incertidumbre cuántica habría hecho fluctuar el valor del campo inflatón. De hecho, si la teoría inflacionaria es correcta, el brote de expansión inflacionaria se detuvo aquí porque una gran y afortunada fluctuación cuántica, hace casi catorce mil millones de años, sacó al inflatón de su alta posición en nuestra vecindad. Pero la historia no acaba ahí. Mientras el valor del inflatón rodaba pendiente abajo hacia el punto que pondría fin a la inflación en nuestro universo burbuja, su valor aún habría estado sujeto a fluctuaciones cuánticas. Las fluctuaciones, a su vez, habrían hecho el valor del inflatón un poco más alto aquí y un poco más alto allá, como la superficie ondulada de una sábana desplegada para hacerla caer sobre una cama. Esto habría producido ligeras variaciones en la energía que el inflatón albergaba a lo largo del espacio. Normalmente, tales variaciones cuánticas son tan minúsculas y suceden en escalas tan ínfimas que son irrelevantes en escalas cosmológicas. Pero la expansión inflacionaria es cualquier cosa menos normal.

La expansión del espacio es tan rápida, incluso durante la salida de la fase inflacionaria, que lo microscópico se habría estirado hasta lo macroscópico. E igual que un minúsculo mensaje garabateado en un globo deshinchado se hace más fácil de leer cuando el globo se infla y su superficie se estira, también la influencia de las fluctuaciones cuánticas se hace visible cuando la expansión inflacionaria estira el tejido cósmico. Más concretamente, mínimas diferencias de energía causadas por fluctuaciones cuánticas se estiran y dan variaciones de temperatura que quedan impresas en la radiación cósmica de fondo de microondas. Los cálculos muestran que las diferencias de temperatura no serían enormes precisamente, pero podrían llegar a una milésima de grado. Si la temperatura es 2,725 K en una región, el resultado de las fluctuaciones cuánticas estiradas hace que sea una pizca más fría, digamos 2,7245 K, o una pizca más caliente, 2,7255 K, en regiones próximas.

Observaciones astronómicas meticulosas han buscado estas variaciones de temperatura. Y las han encontrado. Tal como predecía la teoría, miden aproximadamente una milésima de grado (véase Figura 3.4). Y lo que es más impresionante: las minúsculas diferencias de temperatura encajan en una imagen del cielo que es perfectamente explicada por los cálculos teóricos. La Figura 3.5 compara las predicciones teóricas de la variación de la temperatura en función de la distancia entre dos regiones (medida por el ángulo entre sus dos visuales respectivas cuando se mira desde la Tierra) con las medidas reales. El acuerdo es asombroso.

El premio Nobel de Física de 2006 fue concedido a George Smoot y John Mather, quienes dirigieron a los más de mil investigadores del equipo del Cosmic Background Explorer que a principios de los años noventa detectaron por primera vez las variaciones de temperatura predichas. Durante la última década, cada nueva y más exacta medida ha supuesto una verifica-

ción aún más precisa de las variaciones de temperatura predichas.

Estos trabajos han coronado una emocionante historia de descubrimientos que empezó con las ideas de Einstein, Friedmann y Lemaître, recibió impulso de los cálculos de Gamow, Alpher y Herman, fue revitalizada por las ideas de Dicke y Peebles, se mostró relevante por las observaciones de Penzias y Wilson, y ahora ha culminado en el trabajo manual de ejércitos de astrónomos, físicos e ingenieros cuyos esfuerzos combinados han medido una rúbrica cósmica fantásticamente minúscula que fue establecida hace miles de millones de años.

En un nivel más cualitativo, todos deberíamos estar agradecidos por las manchas en la Figura 3.4. Al final de la inflación en nuestro universo burbuja, regiones con una energía ligeramente mayor (o lo que es equivalente, vía $E = mc^2$, regiones con masa ligeramente mayor) ejercían una atracción gravitatoria ligeramente más intensa, atrajeron más partículas de sus entornos y con ello se hicieron más grandes. A su vez, los mayores agregados ejercían una atracción gravitatoria aún más intensa, con lo que atraían aún más materia y se hacían aún más grandes. Con el tiempo, este efecto bola de nieve produjo la formación de grumos de materia y energía que, durante miles de millones de años, evolucionaron hasta dar galaxias y las estrellas en su interior. De este modo, la teoría inflacionaria establece un vínculo notable entre las estructuras más grandes y las más pequeñas en el cosmos. La propia existencia de galaxias, estrellas, planetas y la vida misma deriva de la incertidumbre cuántica microscópica amplificada por la expansión inflacionaria.

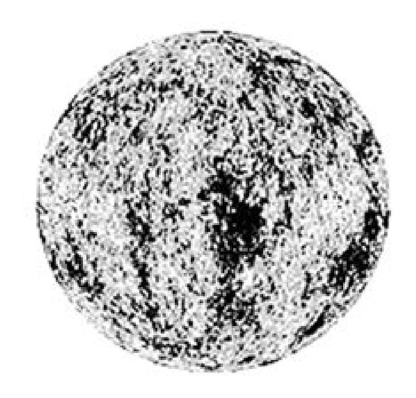


FIGURA 3.4. La enorme expansión espacial en la cosmología inflacionaria estira las fluctuaciones cuánticas desde lo microscópico hasta lo macroscópico, lo que produce variaciones de temperatura observables en la radiación cósmica de fondo de microondas (las manchas oscuras están ligeramente más frías que las más suaves).

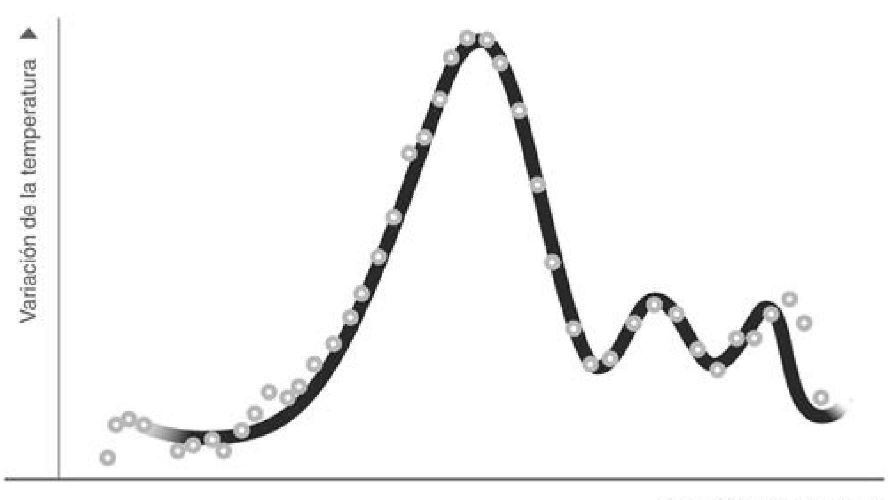


FIGURA 3.5. La pauta de las diferencias de temperatura en la radiación cósmica de fondo de microondas. Variaciones de temperatura en el eje vertical; la separación entre dos localizaciones (medida por el ángulo entre sus visuales respectivas vistas desde la Tierra —ángulos más grandes a la izquierda, ángulos más pe-

queños a la derecha—) en el eje horizontal.[39] *La curva teórica es continua; los círculos representan los datos observacionales.*

Los cimientos teóricos de la inflación pueden ser más bien provisionales: después de todo, la inflación es un campo hipotético cuya existencia aún está por demostrar; su curva de energía potencial es postulada por investigadores, no revelada por la observación; la inflación debe de empezar de algún modo en la cima de su curva de energía en una región de espacio; y así sucesivamente. Pese a todo, e incluso si algunos detalles de la teoría no son completamente correctos, el acuerdo entre teoría y observación ha convencido a muchos de que el esquema inflacionario destila una verdad profunda sobre la evolución cósmica. Y puesto que muchísimas versiones de la inflación son eternas, y dan lugar a un número cada vez mayor de universos burbuja, teoría y observación se combinan para dar un argumento indirecto pero convincente a favor de esta segunda versión de mundos paralelos.

Experimentando el multiverso inflacionario

En un multiverso mosaico no hay una clara divisoria entre un universo paralelo y otro. Todos son parte de una única extensión espacial cuyas características cualitativas generales son similares de una región a otra. La sorpresa está en los detalles. La mayoría de nosotros no esperaría que los mundos se repitan; la mayoría de nosotros no esperaría encontrar versiones de nosotros mismos, nuestros amigos o nuestras familias. Pero si pudiéramos viajar suficientemente lejos, eso es lo que encontraríamos.

En un multiverso inflacionario, los universos miembros están claramente separados. Cada uno es un agujero en el queso cósmico, separado de los otros por dominios en los que el valor del inflatón permanece alto. Puesto que tales regiones interpuestas aún están experimentando expansión inflacionaria, los universos burbuja son rápidamente separados, con una velocidad de recesión proporcional a la cantidad de espacio que se está dilatando entre ellos. Cuanto más alejados están, mayor es la velocidad de expansión; el resultado final es que burbujas distantes se separan a una velocidad mayor que la de la luz. Incluso con tiempo y tecnología ilimitados, no hay modo de cruzar tal divisoria. No hay modo de enviar siquiera una señal.

Pese a todo, podemos imaginar un viaje a uno o más de los otros universos burbuja. ¿Qué encontraríamos en dicho viaje? Bueno, puesto que cada universo burbuja resulta del mismo proceso —el inflatón es sacado de su alta posición, lo que da una región que sale de la expansión inflacionaria—, todos están gobernados por la misma teoría física y por ello todos están sujetos al mismo conjunto de leyes físicas. Pero, del mismo modo que el comportamiento de gemelos idénticos puede diferir profundamente como resultado de diferencias ambientales, leyes idénticas pueden manifestarse de maneras profundamente diferentes en ambientes diferentes.

Imaginemos, por ejemplo, que uno de los otros universos burbuja se parece mucho al nuestro, salpicado de galaxias que contienen estrellas y planetas, pero con una diferencia esencial: permeando el universo hay un campo magnético, miles de veces más fuerte que el creado en nuestros más avanzados aparatos MRI, y que no puede ser desconectado por ningún técnico. Este potente campo afectaría al comportamiento de muchas cosas. No sólo los objetos que contienen hierro tendrían un fastidioso hábito de salir volando en la dirección del campo, sino que cambiarían incluso las propiedades básicas de partícu-

las, átomos y moléculas. Un campo magnético suficientemente intenso perturbaría tanto la función celular que la vida tal como la conocemos no podría sostenerse.

Pero igual que las leyes físicas que actúan dentro de un MRI son las mismas leyes que actúan fuera, también las leyes físicas que actúan en este universo magnético serían las mismas que las nuestras. Las discrepancias en los resultados experimentales y las características observables serían debidas solamente a un aspecto del ambiente: el intenso campo magnético. Científicos inteligentes en el universo magnético sortearían este factor ambiental y llegarían a las mismas leyes matemáticas que nosotros hemos descubierto.

Durante los últimos cuarenta años, los investigadores han construido un argumento a favor de un escenario similar aquí, en nuestro propio universo. La teoría más alabada de la física fundamental, el *modelo estándar de la física de partículas*, postula que estamos inmersos en una niebla exótica llamada *campo de Higgs* (con el nombre del físico inglés Peter Higgs, quien, con importantes aportaciones de Robert Brout, François Englert, Gerald Guralnik, Carl Hagen y Tom Kibble, avanzó esta idea en los años sesenta). Tanto los campos de Higgs como los campos magnéticos son invisibles y por ello pueden llenar el espacio sin revelar directamente su presencia. Sin embargo, según la moderna teoría de partículas, un campo de Higgs se camufla mucho más. Cuando las partículas se mueven a través de un campo de Higgs uniforme que llena el espacio, no se aceleran, no se frenan, no están obligadas a seguir trayectorias concretas, como algunas harían en presencia de un campo magnético intenso. En su lugar, afirma la teoría, son influenciadas de maneras más sutiles y profundas.

Cuando las partículas fundamentales atraviesan un campo de Higgs, *adquieren y mantienen la masa que los experimentos nos dicen que poseen*. Según esta idea, cuando se empuja a un electrón o a

un quark en un intento por cambiar su velocidad, la resistencia que se siente procede del «roce» de la partícula contra un campo de Higgs parecido a una melaza. A esta resistencia es a lo que llamamos la masa de la partícula. Si usted eliminara el campo de Higgs de una región, la masa de las partículas que la atraviesan desaparecería rápidamente. Si duplicara el valor del campo de Higgs en otra región, la masa de las partículas pasaría rápidamente a ser el doble de su masa habitual.[38]

Tales cambios inducidos por el hombre son hipotéticos, porque la energía requerida para modificar sustancialmente el valor de un campo de Higgs siquiera en una pequeña región del espacio está muchísimo más allá de la que podemos reunir. (Los cambios son también hipotéticos porque la existencia de los campos de Higgs aún está en el aire. Los teóricos prevén colisiones altamente energéticas entre protones en el Gran Colisionador de Hadrones en las que se desprendan pequeños trozos del campo de Higgs —partículas de Higgs— que pueden ser detectados en los próximos años). Pero en muchas versiones de la cosmología inflacionaria, *un campo de Higgs tendría naturalmente diferentes valores en diferentes universos burbuja*.

Un campo de Higgs, igual que un campo inflatón, tiene una curva que registra la cantidad de energía que contiene para los diversos valores que puede asumir. Sin embargo, una diferencia esencial con respecto a la curva de energía del campo inflatón es que el Higgs se asienta normalmente no en el valor 0 (como en la Figura 3.1), sino que más bien rueda hasta uno de los pozos que se ilustran en la Figura 3.6a. Imaginemos, entonces, una etapa temprana en cada uno de dos universos burbuja, el nuestro y otro. En ambos, el tempestuoso y ardiente frenesí hace que el valor del campo de Higgs oscile incontroladamente. A medida que cada universo se expande y enfría, el campo de Higgs se calma y su valor rueda hacia uno de los pozos en la Figura 3.6a. En nuestro universo, el valor del campo de Higgs se

asienta, digamos, en el pozo izquierdo, lo que da lugar a las propiedades de las partículas que son familiares por la observación cotidiana. Pero en el otro universo, el movimiento del Higgs puede dar como resultado que su valor se asiente en el pozo derecho. Si lo hiciera, el universo tendría propiedades sustancialmente diferentes del nuestro. Aunque las leyes subyacentes en ambos universos serían las mismas, las masas y otras varias propiedades no lo serían.

Incluso una modesta diferencia en las propiedades de las partículas tendría importantes consecuencias. Si la masa del electrón en otro universo burbuja fuera unas pocas veces mayor que la que es aquí, electrones y protones tenderían a fusionarse, formando neutrones e impidiendo con ello la producción generalizada de hidrógeno. Las fuerzas fundamentales —la fuerza electromagnética, las fuerzas nucleares y (creemos) la gravedad— también son transmitidas por partículas. Cambie las propiedades de las partículas y cambiarán drásticamente las propiedades de las fuerzas. Cuanto más pesada es una partícula, por ejemplo, más lento es su movimiento, y con ello más corta es la distancia sobre la que se transmite la fuerza correspondiente. La formación y la estabilidad de los átomos en nuestro universo burbuja se basa en las propiedades de las fuerzas electromagnética y nuclear. Si se modifican sustancialmente dichas fuerzas, los átomos se descompondrán o, lo que es más probable, no llegarán a formarse. Un cambio apreciable en las propiedades de las partículas interrumpiría los propios procesos que dan a nuestro universo sus características familiares.

La Figura 3.6a ilustra solamente el caso más simple, en el que hay un único tipo de campo de Higgs. Pero los físicos teóricos han explorado escenarios más complicados que incluyen múltiples campos de Higgs (pronto veremos que tales posibilidades surgen de forma natural de la teoría de cuerdas), que se traducen en un conjunto aún más rico de universos burbuja

distintos. Un ejemplo con dos campos de Higgs se ilustra en la Figura 3.6b. Como antes, los diversos pozos representan valores del campo de Higgs en los que podrían asentarse uno u otro de los universos burbuja.

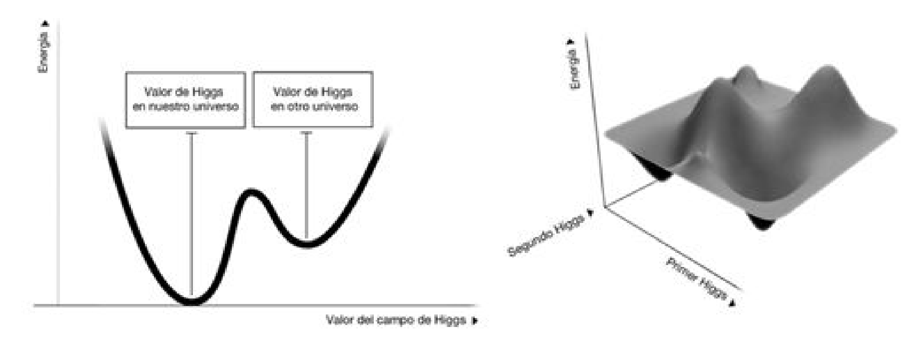


FIGURA 3.6. (a) Una curva de energía potencial para un campo de Higgs que tiene dos hoyos. Las características familiares de nuestro universo están asociadas con el asentamiento del campo en el hoyo izquierdo; sin embargo, en otro universo el campo puede asentarse en el hoyo derecho, lo que da características físicas diferentes. (b) Una muestra de curva de energía potencial para una teoría con dos campos de Higgs.

Permeados por tales valores poco familiares de diversos campos de Higgs, estos universos diferirían considerablemente del nuestro, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.7. Esto haría de un viaje a través del multiverso inflacionario una empresa peligrosa. Muchos de los otros universos no serían lugares que usted quisiera incluir en su itinerario, porque las condiciones serían incompatibles con los procesos biológicos esenciales para la supervivencia, lo que daría nuevo significado al dicho de que en ningún lugar como en casa. En el multiverso inflacionario, nuestro universo muy bien podría ser una isla oasis en un gigantesco pero básicamente inhóspito archipiélago cósmico.



FIGURA 3.7. Puesto que los campos de Higgs pueden asentarse en diferentes valores en diferentes burbujas, los universos en el multiverso inflacionario pueden tener diferentes características físicas, incluso si todos los universos están gobernados por las mismas leyes físicas fundamentales.

Universos en una cáscara de nuez

Debido a sus diferencias fundamentales, podría parecer que hay poca relación entre los multiversos mosaico e inflacionario. La variedad mosaico surge si la extensión del espacio es infinita; la variedad inflacionaria surge de una expansión inflacionaria eterna. Pese a todo, hay una profunda y maravillosamente satisfactoria conexión entre ellas, una conexión que cierra el círculo de la discusión en los dos capítulos previos. Los univer-

sos paralelos que surgen de la inflación generan sus primos mosaico. El proceso tiene que ver con el tiempo.

De las muchas cosas extrañas que reveló el trabajo de Einstein, la fluidez del tiempo es la más difícil de captar. Mientras que la experiencia cotidiana nos convence de que existe una idea objetiva del paso del tiempo, la relatividad muestra que esto es un artificio de la vida a velocidades bajas y gravedad débil. Muévase a velocidad próxima a la de la luz, o sumérjase en un potente campo gravitatorio, y la idea familiar y universal del tiempo se evaporará. Si usted pasa corriendo junto a mí, las cosas que yo digo que ocurrieron en el mismo instante han ocurrido en instantes diferentes para usted. Si usted está suspendido cerca del borde de un agujero negro, una hora que pasa en su reloj será inmensamente larga en el mío. Esto no es un truco de un mago o el engaño de un hipnotizador. El paso del tiempo depende de las circunstancias particulares —trayectoria seguida y gravedad experimentada— del medidor.[40]

Cuando se aplica al universo entero, o a nuestra burbuja en un escenario inflacionario, esto plantea inmediatamente una pregunta: ¿cómo este tiempo maleable y a medida del consumidor se aviene con la noción de un tiempo cosmológico absoluto? Hablamos libremente de la «edad» de nuestro universo, pero dado que las galaxias se están moviendo rápidamente unas con respecto a otras, a velocidades dictadas por sus diversas separaciones, ¿no crea la relatividad del paso del tiempo un problema embarazoso para cualquier presunto cronometrador cósmico? Y en concreto, cuando hablamos de que nuestro universo tiene catorce mil millones de años, ¿estamos utilizando un reloj particular para medir esa duración?

Sí. Y una cuidadosa consideración de dicho tiempo cósmico revela un vínculo directo entre universos paralelos de las variedades inflacionaria y mosaico.

Cualquier método que utilicemos para medir el paso del tiempo implica un examen del cambio que ocurre en algún sistema físico particular. Cuando utilizamos un reloj de pared común, examinamos el cambio en la posición de sus manecillas. Cuando utilizamos el Sol, examinamos el cambio en su posición en el cielo. Cuando utilizamos el carbono 14, examinamos el porcentaje de una muestra original que ha sufrido desintegración radiactiva para transformarse en nitrógeno. El precedente histórico y la conveniencia general nos han llevado a utilizar la rotación y la revolución de la Tierra como referentes físicos, lo que da lugar a nuestras nociones estándar de «día» y «año». Pero cuando estamos pensando en escalas cósmicas hay otro método, más habitual, para medir el tiempo.

Hemos visto que la expansión inflacionaria produce vastas regiones cuyas propiedades son en promedio homogéneas. Mida las temperaturas, presiones y densidades medias de materia en dos regiones grandes pero separadas dentro de un universo burbuja y los resultados coincidirán. Los resultados pueden cambiar con el tiempo, pero la uniformidad a gran escala asegura que, en promedio, el cambio *aquí* es el mismo que el cambio *allí*. A modo de ejemplo, la densidad de masa en nuestro universo burbuja ha disminuido continuamente durante nuestra historia de miles de millones de años, en virtud de la incesante expansión del espacio; pero debido a que el cambio ha ocurrido de manera uniforme, la homogeneidad a gran escala de nuestra burbuja no se ha interrumpido.

Esto resulta importante porque, así como la cantidad de carbono 14 continuamente decreciente en la materia orgánica proporciona un medio de medir el paso del tiempo en la Tierra, también la densidad de masa continuamente decreciente proporciona un medio de medir el paso del tiempo a lo largo del espacio. Y puesto que el cambio ha sucedido de manera uniforme, la densidad de masa como un marcador del paso del tiem-

po proporciona a nuestro universo burbuja un patrón global. Si todos calibran diligentemente sus relojes con la densidad de masa promedio (y la vuelven a calibrar después de viajes a agujeros negros, o períodos de viaje a una velocidad próxima a la de la luz), la sincronía de nuestros relojes a lo largo de nuestro universo burbuja se mantendrá. Cuando hablamos de la edad del universo —es decir, la edad de nuestra burbuja— estamos imaginando el paso del tiempo en tales relojes cósmicamente calibrados; y sólo con respecto a ellos el tiempo cósmico es un concepto razonable.

En la era más temprana de nuestro universo burbuja, el mismo razonamiento se habría aplicado con un pequeño matiz. La materia ordinaria aún no se había formado, de modo que no podemos hablar de la densidad de masa promedio en el espacio. En su lugar, el campo inflacionario llevaba una gran reserva de energía de nuestro universo —energía que pronto se convertiría en las partículas familiares—, de modo que tenemos que concebir una puesta en marcha de nuestros relojes de acuerdo con la densidad de energía del campo inflatón.

Ahora bien, la energía del inflatón está determinada por su valor, resumido en su curva de energía. Para determinar cuál es el tiempo en una localización dada en nuestra burbuja, tenemos que determinar el valor del inflatón en esa localización. Luego, de la misma forma que dos árboles tienen la misma edad si tienen el mismo número de anillos, y de la misma forma que dos muestras de sedimento glacial tienen la misma edad si tienen el mismo porcentaje de carbono radiactivo, *dos localizaciones en el espacio están atravesando el mismo instante de tiempo cuando tienen el mismo valor del campo inflatón*. Así es cómo ponemos en marcha y sincronizamos relojes en nuestro universo burbuja.

La razón por la que he explicado todo esto es que, cuando se aplican al queso gruyer cósmico del multiverso inflacionario, estas observaciones tienen una consecuencia sorprendentemen-

te contraintuitiva. De la misma forma que Hamlet declara «yo podría estar confinado en una cáscara de nuez, y considerarme un rey del espacio infinito», cada uno de los universos burbuja parece tener una extensión espacial finita cuando se examina desde fuera, pero una extensión espacial infinita cuando se examina desde dentro. Y ésa es una idea maravillosa. La extensión espacial infinita es precisamente lo que necesitamos para universos paralelos mosaico. De modo que podemos introducir el multiverso mosaico en la historia inflacionaria.

La extrema disparidad entre las perspectivas de los observadores exterior e interior se debe a que tienen concepciones del tiempo enormemente diferentes. Aunque esto no es obvio ni mucho menos, ahora veremos que *lo que parece un tiempo inacabable para un observador externo parece un espacio inacabable, en cada instante de tiempo, para un observador interno*.[41]

El espacio en un universo burbuja

Para entender cómo se produce esto, imagine que Trixie, que flota dentro de una región del espacio llena de inflatón que se expande rápidamente, está observando la formación de un universo burbuja próximo. Apuntando su inflatómetro a la burbuja en crecimiento, es capaz de seguir directamente el valor de su campo inflatón variable. Aunque la región —el agujero en el queso cósmico— es tridimensional, es más sencillo examinar el campo en una sección transversal unidimensional a lo largo de su diámetro, y cuando Trixie lo hace registra los datos de la Figura 3.8a. Cada fila superior muestra el valor del inflatón en instantes sucesivos, desde la perspectiva de Trixie. Y como es evidente en la figura, Trixie ve que el universo burbuja —repre-

sentado en la figura por las localizaciones más tenues donde el valor del inflatón ha caído— se hace cada vez mayor.

70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70
80	70	60	50	40	30	20	10	20	30	40	50	60	70	80
90	80	70	60	50	40	03	20	30	40	50	60	70	80	90
100	90	80	70	60	50	40	30	40	50	60	70	80	90	100
100	100	90	80	70	60	50	40	50	60	70	80	90	100	100
100	100	100	90	80	70	60	50	60	70	80	90	100	100	100
100	100	100	100	90	80	70	60	70	80	90	100	100	100	100
100	100	100	100	100	90	80	70	80	90	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	90	80	90	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

FIGURA 3.8a. Cada fila registra el valor del inflatón en un instante de tiempo desde la perspectiva de alguien que está fuera. Las filas más altas corresponden a momentos más tardíos. Las columnas denotan posiciones en el espacio. Una burbuja es una región del espacio que deja de inflarse debido a una caída del valor del inflatón. Las entradas más suaves denotan el valor del campo inflatón dentro de la burbuja. Desde la perspectiva del observador exterior, la burbuja se hace cada vez más grande.

Imagine ahora que Norton también está examinando este mismo universo burbuja pero desde el interior; está trabajando duramente haciendo observaciones astronómicas detalladas con su propio inflatómetro. Norton, a diferencia de Trixie, se adhiere a una noción de tiempo que está calibrada por el valor del inflatón. Esto es clave para la conclusión que perseguimos, de modo que necesito que usted lo compre por entero. Imagi-

ne, si usted quiere, que todo el mundo en el universo burbuja lleva un reloj que mide y muestra el valor del inflatón. Cuando Norton convoca a una cena, da instrucciones a los invitados para que estén en su casa cuando el valor del inflatón sea 60. Puesto que los relojes de todos están calibrados con el mismo patrón uniforme —el valor del campo inflatón—, la cena empieza sin problemas. Todo el mundo se presenta en el mismo momento porque todos están ajustados al mismo concepto de sincronía.

Conociendo esto, es una cuestión simple para Norton calcular el tamaño del universo burbuja en cualquier instante de su tiempo dado. De hecho, es un juego de niños: todo lo que Norton tiene que hacer es pintar números. Conectando todos los puntos que tienen el mismo valor numérico para el campo inflatón, Norton puede delimitar todas las localizaciones dentro de la burbuja en un único instante de tiempo. Su tiempo. El tiempo del observador interior.

El dibujo de Norton en la Figura 3.8b lo dice todo. Cada curva, que conecta puntos con el mismo valor del campo inflatón, representa todo el espacio en un instante de tiempo dado. Tal como la figura deja claro, cada curva se extiende indefinidamente, lo que significa que el tamaño del universo burbuja, según sus habitantes, es *infinito*. Esto refleja que el tiempo sin fin del observador exterior, experimentado por Trixie como el número sin fin de filas en la Figura 3.8, aparece como un espacio sin fin, en cada instante de tiempo, según un observador interno como Norton.

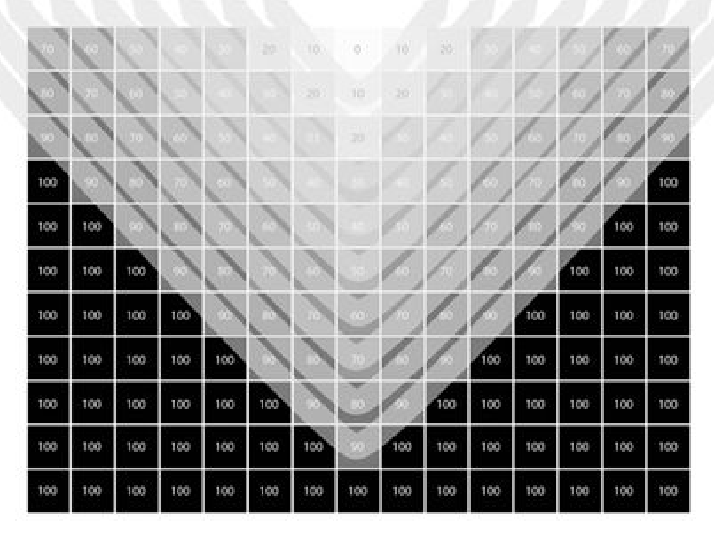


FIGURA 3.8b. La misma información que en la Figura 3.8a organizada de forma diferente por alguien dentro de la burbuja. Los valores del inflatón que coinciden corresponden a instantes idénticos, de modo que las curvas dibujadas barren todos los puntos en el espacio que existen en el mismo instante de tiempo. Los valores más pequeños del inflatón corresponden a momentos más tardíos. Nótese que las curvas podrían extenderse al infinito, de modo que desde la perspectiva de un observador interno el espacio es infinito.

Ésta es una idea poderosa. En el capítulo 2 encontramos que el multiverso mosaico era contingente en un espacio infinitamente grande, algo que, como discutimos allí, podría ser cierto o no. Ahora vemos que cada burbuja dentro del multiverso inflacionario es espacialmente finita desde fuera pero espacialmente infinita desde dentro. Si el multiverso inflacionario es real, entonces los habitantes de una burbuja —nosotros— seríamos miembros no sólo del multiverso inflacionario, sino también del multiverso mosaico.[42]

Cuando yo supe por primera vez de los multiversos mosaico e inflacionario, fue la variedad inflacionaria la que me pareció

más plausible. La cosmología inflacionaria resuelve varios enigmas tradicionales al mismo tiempo que hace predicciones que encajan con las observaciones. Y por el razonamiento que hemos visto, la inflación es naturalmente un proceso que nunca termina; produce un universo burbuja tras otro, en uno de los cuales habitamos nosotros. El multiverso mosaico, por otra parte, al tener toda su fuerza cuando el espacio es no sólo grande, sino verdaderamente infinito (usted quizá tendría una réplica en un universo grande, pero su repetición en un universo infinito está garantizada), parecía evitable: después de todo podría darse el caso de que el universo tenga un tamaño finito. Pero ahora vemos que los universos burbuja de la inflación eterna, cuando se analizan adecuadamente desde el punto de vista de sus habitantes, *son* espacialmente infinitos. Los universos paralelos inflacionarios engendran universos mosaico.

La mejor teoría cosmológica disponible para explicar los mejores datos cosmológicos disponibles nos lleva a pensar que ocupamos uno entre un enorme sistema inflacionario de universos paralelos, cada uno de los cuales alberga su propia enorme colección de universos paralelos mosaico. La investigación más avanzada da un cosmos en el que no sólo hay universos paralelos, sino universos paralelos paralelos. Sugiere que la realidad no sólo es expansiva, sino abundantemente expansiva.

4

Unificando las leyes de la naturaleza

En el camino a la teoría de cuerdas

Del big bang a la inflación, la cosmología moderna rastrea sus raíces hasta un único nexo científico: la teoría de la relatividad general de Einstein. Con su nueva teoría de la gravedad, Einstein dio un vuelco a la idea aceptada de un espacio y un tiempo rígidos e inmutables; ahora la ciencia tenía que aceptar un cosmos dinámico. Contribuciones de esta magnitud son raras. Pese a todo, Einstein soñaba con llegar a alturas aún mayores. Con el arsenal matemático y la intuición geométrica que él había acumulado para los años veinte, se propuso desarrollar una *teoría del campo unificado*.

Por esto, Einstein entendía un marco que uniera todas las fuerzas de la naturaleza en un único y coherente tapiz matemático. En lugar de tener un conjunto de leyes para unos fenómenos físicos y un conjunto diferente para otros, Einstein quería fusionar todas las leyes en un todo inconsútil. La historia ha juzgado que las décadas de intenso trabajo de Einstein hacia la unificación han tenido un impacto poco duradero —el sueño era noble, pero el momento era prematuro—, pero otros han asumido la tarea y han hecho esfuerzos sustanciales, de los cuales la propuesta más refinada es la *teoría de cuerdas*.

Mis libros previos *El universo elegante* y *El tejido del cosmos* cubrían la historia y los aspectos esenciales de la teoría de cuer-

das. En los años transcurridos desde su aparición, la riqueza y el estatus de la teoría se han enfrentado a un diluvio de cuestionamientos públicos. Esto es muy razonable. Pese a todos sus avances, la teoría de cuerdas aún tiene que hacer predicciones definitivas cuya investigación experimental pudiera probar si la teoría es cierta o falsa. Puesto que las siguientes tres variedades de multiverso que encontraremos (en los capítulos 5 y 6) surgen de una perspectiva de teoría de cuerdas, es importante abordar el estado actual de la teoría, así como las posibilidades de tomar contacto con los datos experimentales y observacionales. Ésta es la tarea de este capítulo.

Una breve historia de la unificación

En la época en que Einstein perseguía el objetivo de la unificación, las fuerzas conocidas eran la gravedad, descrita por su propia relatividad general, y el electromagnetismo, descrito por las ecuaciones de Maxwell. Einstein imaginaba unir las dos en un único enunciado matemático que expresaría cómo actúan todas las fuerzas de la naturaleza, y tenía grandes esperanzas en esta teoría unificada. Consideraba el trabajo sobre unificación de Maxwell en el siglo XIX como una contribución arquetípica al pensamiento humano, y tenía razón. Antes de Maxwell, la electricidad que fluía por un cable, la fuerza generada por un imán y el flujo de luz hacia la Tierra procedente del Sol se veían como tres fenómenos separados y no relacionados. Maxwell reveló que en realidad formaban una trinidad científica entretejida. Las corrientes eléctricas *producen* campos magnéticos; los imanes que se mueven en la vecindad de un cable metálico *producen* corrientes eléctricas, y las perturbaciones ondulatorias en

los campos eléctrico y magnético *producen* luz. Einstein preveía que su propio trabajo continuaría el programa de consolidación de Maxwell haciendo el siguiente, y posiblemente último, movimiento hacia una descripción completamente unificada de las leyes de la naturaleza, una descripción que uniría electromagnetismo y gravedad.

Éste no era un objetivo modesto, y Einstein no lo tomó a la ligera. Tenía una capacidad inigualable para dedicarse de lleno a los problemas que se había planteado, y durante los treinta últimos años de su vida el problema de la unificación se convirtió en su obsesión principal. Su secretaria y guardiana, Helen Dukas, estaba con Einstein en el hospital de Princeton el día anterior a su muerte, el 17 de abril de 1955. Ella cuenta cómo Einstein, en cama pero sintiéndose un poco más fuerte, preguntó por las páginas con ecuaciones en las que había estado manipulando incesantemente símbolos matemáticos con la vana esperanza de que se materializara la teoría del campo unificado. Einstein no llegó a ver el sol de la mañana. Sus garabatos finales no arrojaron más luz sobre la unificación.[43]

Pocos de los contemporáneos de Einstein compartían su pasión por la unificación. Desde mediados de los años veinte hasta mediados de los años sesenta, los físicos, guiados por la mecánica cuántica, estaban desentrañando los secretos del átomo y aprendiendo a aprovechar sus potencias ocultas. El atractivo de investigar los constituyentes de la materia era inmediato y poderoso. Aunque muchos coincidían en que la unificación era un objetivo laudable, era sólo un interés pasajero en una época en la que físicos teóricos y experimentales estaban trabajando para revelar las leyes del reino microscópico. Con la muerte de Einstein, el trabajo sobre unificación llegó a un punto muerto.

Su fracaso se agravó cuando la investigación posterior demostró que su búsqueda de la unidad había tenido unas miras demasiado estrechas. Einstein no sólo había descartado el papel

de la física cuántica (él creía que la teoría unificada reemplazaría a la mecánica cuántica y por ello no había necesidad de incorporarla de entrada), sino que tampoco había tenido en cuenta otras dos fuerzas reveladas por los experimentos: la *fuerza nuclear fuerte* y la *fuerza nuclear débil*. La primera ofrece un potente pegamento que mantiene unidos los núcleos de los átomos, mientras que la segunda es responsable, entre otras cosas, de la desintegración radiactiva. La unificación tendría que combinar no sólo dos fuerzas, sino cuatro; el sueño de Einstein parecía mucho más remoto.

Durante finales de los años sesenta y los años setenta, la marea cambió. Los físicos se dieron cuenta de que los métodos de la teoría cuántica de campos, que habían sido aplicados satisfactoriamente a la fuerza electromagnética, también proporcionaban descripciones de las fuerzas nucleares débil y fuerte. Las tres fuerzas no gravitatorias podían así describirse utilizando el mismo lenguaje matemático. Además, el estudio detallado de estas teorías cuánticas de campos —muy en particular en la obra que les valió el premio Nobel a Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, así como las ideas posteriores de Glashow y su colega de Harvard, Howard Georgi— reveló relaciones que sugerían una unidad potencial entre las fuerzas electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte. Siguiendo el ejemplo de Einstein casi cincuenta años antes, los teóricos argumentaron que estas tres fuerzas aparentemente distintas podían ser, en realidad, manifestaciones de una única fuerza monolítica de la naturaleza.[44]

Hubo avances impresionantes hacia la unificación, pero comparado con el excitante telón de fondo era un problema molesto. Cuando los científicos aplicaban los métodos de la teoría cuántica de campos a la cuarta fuerza de la naturaleza, la gravedad, las matemáticas simplemente no funcionaban. Los cálculos que utilizaban la mecánica cuántica y la descripción

mediante la relatividad general de Einstein del campo gravitatorio daban resultados que equivalían a un galimatías matemático. Por acertadas que hubieran sido la relatividad general y la mecánica cuántica en sus dominios originales, lo grande y lo pequeño, el resultado absurdo del intento por unirlas revelaba una profunda fisura en las leyes de la naturaleza subyacentes. Si las leyes que usted tiene resultan ser mutuamente incompatibles, entonces es evidente que las leyes que usted tiene no son las leyes correctas. La unificación había sido un objetivo estético: ahora se transformaba en un imperativo lógico.

Los años ochenta fueron testigos del siguiente desarrollo crucial. Fue entonces cuando un nuevo enfoque, la *teoría de supercuerdas*, captó la atención de los físicos de todo el mundo. Alivió la hostilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica, y con ello dio esperanzas de que la gravedad podría ser introducida en un marco mecanocuántico unificado. Había nacido la era de unificación de supercuerdas. La unificación avanzó a un ritmo intenso, y pronto se llenaron miles de páginas de revistas con cálculos que aclaraban aspectos de la aproximación y establecían la base para su formulación sistemática. Emergió una estructura matemática impresionante e intrincada, pero muchas cosas en la teoría de supercuerdas (la *teoría de cuerdas*, para abreviar) seguían siendo misteriosas.[45]

Luego, a mediados de los años noventa, el intento de los teóricos de desvelar aquellos misterios introdujo inesperadamente la teoría de cuerdas en la narrativa del multiverso. Los investigadores sabían desde hacía tiempo que los métodos matemáticos que se estaban utilizando para analizar la teoría de cuerdas apelaban a una gran variedad de aproximaciones y por ello necesitaban ser refinados. Cuando se desarrollaron algunos de estos refinamientos, los investigadores se dieron cuenta de que las matemáticas sugerían claramente que nuestro universo podría pertenecer a un multiverso. De hecho, las matemáticas de

la teoría de cuerdas sugerían no sólo uno, sino varios tipos diferentes de multiversos de los cuales nosotros podríamos ser parte.

Para captar plenamente estos desarrollos, y para establecer su papel en nuestra búsqueda en curso de las leyes profundas del cosmos, necesitamos retroceder un paso y evaluar primero el estado de la teoría de cuerdas.

Campos cuánticos revividos

Empecemos echando una mirada más cercana al marco tradicional y altamente satisfactorio de la teoría cuántica de campos. Esto nos preparará para discutir la unificación de cuerdas, así como las conexiones fundamentales entre estas dos aproximaciones para la formulación de las leyes de la naturaleza.

La física clásica, como vimos en el capítulo 3, describe un campo como una especie de niebla que permea una región del espacio y puede transmitir perturbaciones en forma de rizos y ondas. Si Maxwell tuviera que describir la luz que está ahora iluminando este texto, por ejemplo, escribiría con entusiasmo sobre las ondas electromagnéticas, producidas por el Sol o por una bombilla cercana, que ondulan a través del espacio en su camino hacia la página impresa. Hubiera descrito matemáticamente el movimiento de las ondas, utilizando números para indicar la intensidad del campo y la dirección en cada punto en el espacio. Un campo ondulante corresponde a números ondulantes: el valor numérico del campo en cualquier localización dada oscila arriba y abajo continuamente.

Cuando la mecánica cuántica se combina con el concepto de campo, el resultado es la teoría cuántica de campos, que tiene

dos características esenciales. Ya las hemos encontrado, pero vale la pena recordarlas. En primer lugar, la incertidumbre cuántica hace que el valor de un campo en cada punto en el espacio fluctúe aleatoriamente —piense en el campo inflatón fluctuante de la cosmología inflacionaria—. En segundo lugar, la mecánica cuántica establece que, de forma algo parecida a como el agua está compuesta de moléculas de H_2O, un campo está compuesto de partículas infinitesimalmente pequeñas conocidas como los *quanta* del campo. En el caso del campo electromagnético, los quanta son fotones, y por eso un teórico cuántico modificaría la descripción clásica de Maxwell de su bombilla diciendo que ésta emite un flujo continuo que comprende cien trillones de fotones por segundo.

Décadas de investigación han establecido que estas características de la mecánica cuántica aplicadas a los campos son completamente generales. Cada campo está sometido a fluctuaciones cuánticas. Y cada campo está asociado con un tipo de partícula. Los electrones son quanta del campo electrónico. Los quarks son quanta del campo de quarks. A modo de imagen mental algo tosca, los físicos imaginan a veces las partículas como nudos o pepitas densas de su campo asociado. Al margen de esta visualización, las matemáticas de la teoría cuántica de campos describen estas partículas como puntos que no tienen extensión espacial ni estructura interna.[46]

Nuestra confianza en la teoría cuántica de campos deriva de un hecho esencial: no hay ningún resultado experimental que contradiga sus predicciones. Más aún, los datos confirman que las ecuaciones de la teoría cuántica de campos describen el comportamiento de las partículas con asombrosa exactitud. El ejemplo más impresionante procede de la teoría cuántica de campos de la fuerza electromagnética, la *electrodinámica cuántica*. Utilizándola, los físicos han realizado cálculos detallados de las propiedades magnéticas del electrón. Los cálculos no son fáci-

les, y se han necesitado décadas para completar las versiones más refinadas. Pero el esfuerzo ha valido la pena. Los resultados coinciden con las medidas reales con una precisión de *diez* cifras decimales, un acuerdo casi inimaginable entre teoría y experimento.

Con un éxito semejante, usted podría prever que la teoría cuántica de campos proporcionaría el marco matemático para entender todas las fuerzas de la naturaleza. Una ilustre cohorte de físicos compartía esta misma expectativa. A finales de los años setenta, el duro trabajo de muchos de estos visionarios había establecido que, de hecho, las fuerzas nucleares débil y fuerte encajan dentro de la rúbrica de la teoría cuántica de campos. Ambas fuerzas son descritas con precisión en términos de campos —los campos débil y fuerte— que evolucionan e interaccionan de acuerdo con las reglas matemáticas de la teoría cuántica de campos.

Pero, como indiqué en la revisión histórica, muchos de estos mismos físicos se dieron cuenta rápidamente de que el caso de la fuerza de la naturaleza restante, la gravedad, era mucho más sutil. Cada vez que las ecuaciones de la relatividad general se combinaban con las de la teoría cuántica de campos, las matemáticas flaqueaban. Utilice las ecuaciones combinadas para calcular la probabilidad cuántica de algún proceso físico —tal como la probabilidad de que colisionen dos electrones, dada su repulsión electromagnética y su atracción gravitatoria— y normalmente obtendrá un *infinito* como respuesta. Aunque algunas cosas en el universo pueden ser infinitas, tales como la extensión del espacio y la cantidad de materia que puede llenarlo, las probabilidades no son una de ellas. Por definición, el valor de una probabilidad debe estar entre 0 y 1 (o, en términos de porcentajes, entre 0 y 100). Una probabilidad infinita no significa que sea muy probable que algo suceda, o que sea seguro que sucede; más bien, es algo absurdo, como hablar del decimoter-

cer huevo en una docena dada. Una probabilidad infinita envía un mensaje matemático claro: las ecuaciones combinadas no tienen sentido.

Los físicos rastrearon los fallos hasta llegar a las fluctuaciones de la incertidumbre cuántica. Las técnicas matemáticas habían sido elaboradas para analizar las fluctuaciones de los campos fuerte, débil y electromagnético, pero cuando se aplicaron los mismos métodos al campo gravitatorio —un campo que gobierna la curvatura del espacio-tiempo— se mostraron ineficaces. Esto dejaba las matemáticas saturadas de inconsistencias tales como probabilidades infinitas.

Para hacerse una idea de por qué, imagine que usted es el propietario de una casa antigua en San Francisco. Si tiene inquilinos que celebran fiestas ruidosas, quizá sea necesario tomar alguna medida, pero a usted no le preocupa que las fiestas comprometan la integridad estructural del edificio. Sin embargo, si hay un terremoto, usted se enfrenta a algo más serio. Las fluctuaciones de las tres fuerzas no gravitatorias —campos que son inquilinos dentro de la casa del espacio-tiempo— son como los incansables fiesteros del edificio. Fue necesaria una generación de físicos teóricos para enfrentarse a estas ruidosas fluctuaciones, pero para los años setenta habían desarrollado métodos matemáticos capaces de describir las propiedades cuánticas de las fuerzas no gravitatorias. Sin embargo, las fluctuaciones del campo gravitatorio son cualitativamente diferentes. Se parecen más a un terremoto. Puesto que el campo gravitatorio está tejido dentro de la propia trama del espacio-tiempo, sus fluctuaciones cuánticas agitan toda la estructura. Cuando se utilizaban para analizar estas ubicuas fluctuaciones cuánticas, los métodos matemáticos colapsaban.[47]

Durante años los físicos no prestaron atención a este problema porque sólo se manifestaba en las condiciones más extremas. La gravedad deja su marca cuando los objetos son muy

masivos, y la mecánica cuántica cuando los objetos son muy pequeños. Y raro es el dominio que es a la vez pequeño y masivo, de modo que para describirlo haya que apelar a la mecánica cuántica y la relatividad general. Sin embargo, existen tales dominios. Cuando gravedad y mecánica cuántica juntas son relevantes, ya sea en el big bang o en los agujeros negros, dominios que *sí* implican extremos de enorme masa comprimida en un tamaño pequeño, las matemáticas dejan de ser válidas en un punto crítico en el análisis, lo que nos deja con preguntas sin responder acerca de cómo empezó el universo y cómo podría terminar en el centro crujiente de un agujero negro.

Además —y ésta es la parte verdaderamente desalentadora —, más allá de los ejemplos concretos de los agujeros negros y el big bang, usted puede calcular cuánta masa puede tener y cuán pequeño tiene que ser un sistema para que la gravedad y la mecánica cuántica desempeñen un papel importante. El resultado es de unas 10^{19} veces la masa de un solo protón, la denominada *masa de Planck*, comprimida en un volumen fantásticamente pequeño de unos 10^{-99} centímetros cúbicos (aproximadamente una esfera de 10^{-33} centímetros de radio, la denominada *longitud de Planck* ilustrada gráficamente en la Figura 4.1).[48] El dominio de la gravedad cuántica está así más de mil billones de veces más allá de las escalas que podemos sondear, incluso con los más potentes aceleradores del mundo. Esta inmensa extensión de territorio no cartografiado fácilmente podría estar llena de nuevos campos y sus partículas asociadas —y quién sabe qué más—. Unificar gravedad y mecánica cuántica requiere viajar de aquí para allá, captando lo conocido y lo desconocido a través de una enorme extensión que, en su mayor parte, es inaccesible experimentalmente. Ésta es una tarea enormemente ambiciosa, y muchos científicos concluyeron que era inalcanzable.

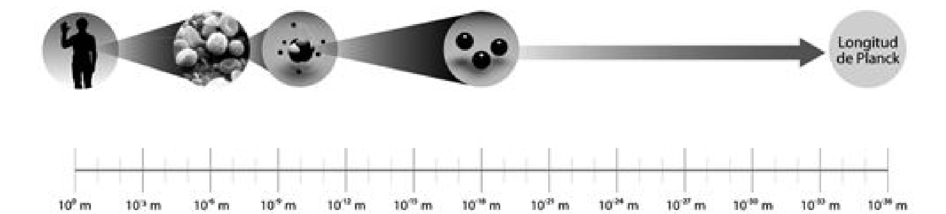


FIGURA 4.1. La longitud de Planck, en donde se confrontan la gravedad y la mecánica cuántica, es unos cien trillones de veces menor que cualquier dominio que haya sido explorado experimentalmente. Leyendo a lo largo del mapa, cada una de las marcas igualmente espaciadas representa una reducción de tamaño en un factor 1.000; esto permite que el mapa quepa en una página, pero visualmente minusvalora el enorme rango de escalas. Para hacerse una idea mejor, note que si un átomo se ampliara hasta ser tan grande como el universo observable, la misma ampliación haría que la longitud de Planck tuviera el tamaño de un árbol medio.

Por todo ello, puede usted imaginarse la sorpresa y el escepticismo cuando, a mediados de los años ochenta, en la comunidad de la física empezaron a correr rumores de que se había producido un avance teórico crucial hacia la unificación con una aproximación llamada teoría de cuerdas.

Teoría de cuerdas

Aunque la teoría de cuerdas tiene una reputación intimidatoria, su idea básica es fácil de captar. Hemos visto que la visión estándar, anterior a la teoría de cuerdas, concibe los ingredientes fundamentales de la naturaleza como partículas puntuales —puntos sin estructura interna— gobernadas por las ecuaciones de la teoría cuántica de campos. Con cada tipo de partícula

diferente hay asociado un tipo de campo diferente. La teoría de cuerdas desafía esta imagen al sugerir que las partículas no son puntos. En su lugar, la teoría propone que son minúsculos filamentos vibrantes, tipo cuerdas, como en la Figura 4.2. Mire desde suficientemente cerca cualquier partícula que previamente se consideraba elemental y la teoría dice que usted encontrará una minúscula cuerda vibrante. Mire en el interior profundo de un electrón, y encontrará una cuerda; mire en el interior de un quark y encontrará una cuerda.

Con una observación todavía más precisa, dice la teoría, usted advertiría que las cuerdas dentro de tipos de partículas diferentes son idénticas, el tema central de la unificación de cuerdas, pero vibran con pautas diferentes. Un electrón es menos masivo que un quark, lo que según la teoría de cuerdas significa que la cuerda del electrón vibra con menos energía que la cuerda del quark (lo que refleja de nuevo la equivalencia de masa y energía encarnada en $E = mc^2$). El electrón también tiene una carga eléctrica cuya magnitud supera a la del quark, y esta diferencia se traduce en otras diferencias más finas entre las pautas vibracionales de las cuerdas asociadas con ellas. Así como diferentes pautas vibracionales de las cuerdas de una guitarra producen diferentes notas musicales, las diferentes pautas vibracionales de los filamentos en la teoría de cuerdas producen diferentes propiedades de las partículas.

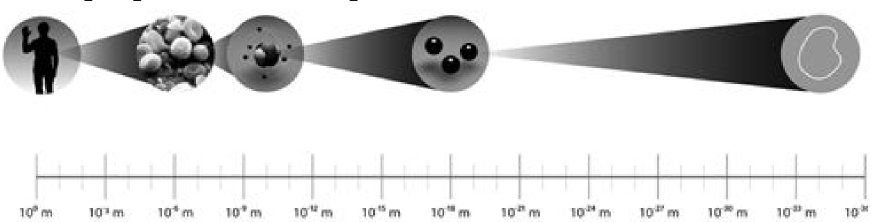


FIGURA 4.2. La propuesta de la teoría de cuerdas para la naturaleza de la física en la escala de Planck imagina que los constituyentes fundamentales de la materia son filamentos simila-

res a cuerdas. Debido al limitado poder de resolución de nuestros equipos, las cuerdas parecen puntos.

De hecho, la teoría nos anima a considerar una cuerda vibrante no meramente como algo que dicta las propiedades de la partícula que la alberga, sino más bien como *la* partícula. Debido al tamaño infinitesimal de la cuerda, del orden de la longitud de Planck —10^{-33} centímetros—, ni siquiera los más refinados experimentos actuales pueden resolver la estructura extendida de la cuerda. El Gran Colisionador de Hadrones, que hace chocar partículas con energías superiores a diez billones de veces la energía que contiene un único protón en reposo, puede sondear escalas de hasta unos 10^{-19} centímetros; esto es una milbillonésima de la anchura de un cabello, pero todavía muchos órdenes de magnitud por encima de lo que sería necesario para resolver fenómenos en la escala de Planck. Y por ello, igual que la Tierra parecería un punto vista desde Plutón, las cuerdas parecerían puntos cuando se estudiaran incluso con el acelerador de partículas más avanzado del mundo. Sin embargo, según la teoría de cuerdas, las partículas *son* cuerdas.

En pocas palabras, eso es la teoría de cuerdas.

Cuerdas, puntos y gravedad cuántica

La teoría de cuerdas tiene muchas otras características esenciales, y los desarrollos que ha experimentado desde que fue propuesta inicialmente han enriquecido enormemente la descripción esquemática que he dado hasta ahora. En el resto de este capítulo (así como en los capítulos 5, 6 y 9) encontraremos algunos de los avances más cruciales, pero quiero resaltar aquí tres puntos sumamente importantes.

Primero, cuando un físico propone un modelo de la naturaleza que utiliza la teoría cuántica de campos, tiene que escoger los campos particulares que contendrá la teoría. Esta elección está guiada por restricciones experimentales (cada tipo de partícula conocido dicta la inclusión de un campo cuántico asociado), así como por intereses teóricos (se incluyen partículas hipotéticas y sus campos asociados, como el inflatón y los campos de Higgs, para abordar problemas abiertos o cuestiones enigmáticas). El *modelo estándar* es el ejemplo primordial. Considerado el logro culminante de la física de partículas del siglo XX por su capacidad de describir con precisión la riqueza de datos recogidos por aceleradores de partículas en todo el mundo, el modelo estándar es una teoría cuántica de campos que contiene *cincuenta y siete* campos cuánticos distintos (los campos correspondientes al electrón, el neutrino, el fotón y los diversos tipos de quarks: el quark arriba, el quark abajo, el quark encanto, y así sucesivamente). Es innegable el tremendo éxito del modelo estándar, pero muchos físicos piensan que una comprensión verdaderamente fundamental no requeriría un surtido de ingredientes tan complejo.

Una característica excitante de la teoría de cuerdas es que las partículas surgen de la propia teoría: aparece un tipo diferente de partícula de cada diferente pauta vibracional de la cuerda. Y puesto que la pauta vibracional determina las propiedades de la correspondiente partícula, si usted entendiera la teoría suficientemente bien como para delinear todas las pautas vibracionales, sería capaz de explicar *todas* las propiedades de *todas* las partículas. Así pues, existe el potencial y la promesa de que la teoría de cuerdas trascienda la teoría cuántica de campos y llegue a derivar matemáticamente todas las propiedades de las partículas. No sólo unificaría todo bajo el paraguas de las cuerdas vibrantes, sino que también establecería que futuras «sorpresas» —tales como el descubrimiento de tipos de partículas actualmente

desconocidas— están incorporadas de entrada en la teoría de cuerdas y por ello serían accesibles, en principio, al cálculo suficientemente elaborado. La teoría de cuerdas no va añadiendo piezas para obtener una descripción de la naturaleza cada vez más completa. Busca una descripción completa desde el principio.

El segundo punto es que entre las posibles vibraciones de las cuerdas hay una que tiene las propiedades precisas para ser la partícula cuántica del campo gravitatorio. Incluso si los intentos teóricos pre-cuerdas para unir la gravedad y la mecánica cuántica no tuvieron éxito, la investigación reveló las propiedades que necesariamente debería poseer una partícula hipotética asociada con el campo gravitatorio cuántico, bautizada como *gravitón*. Los estudios concluyeron que el gravitón debe carecer de masa y de carga, y debe tener la propiedad mecano-cuántica conocida como *espín-2*. (Dicho de modo muy burdo, el gravitón debería girar como una peonza con una velocidad de giro doble que la de un fotón.)[49] De una forma maravillosa, los primeros teóricos de cuerdas —John Schwarz, Joël Scherk e, independientemente, Tamiaki Yoneya— encontraron que precisamente en la lista de las pautas vibracionales de la cuerda había una cuyas propiedades encajaban con las del gravitón. Exactamente. Cuando a mediados de los años ochenta se presentaron argumentos convincentes de que la teoría de cuerdas era una teoría mecano-cuántica matemáticamente consistente (debidos básicamente al trabajo de Schwarz y su colaborador Michael Green), la presencia de gravitones implicaba que *la teoría de cuerdas proporcionaba una largo tiempo buscada teoría cuántica de la gravedad*. Éste es el logro más importante en un resumen de la teoría de cuerdas y la razón por la que rápidamente ascendiera a la prominencia científica en todo el mundo.[50]

Tercero: por radical que pueda ser una teoría de cuerdas propuesta, recapitula una pauta reverenciada en la historia de la fí-

sica. Normalmente, las teorías nuevas acertadas no hacen obsoletas a sus predecesoras. Lo normal es que las teorías exitosas engloben a sus predecesoras, al tiempo que amplían el abanico de fenómenos que pueden describirse con precisión. La relatividad especial extiende el conocimiento al dominio de altas velocidades; la relatividad general extiende el conocimiento aún más, al dominio de masas grandes (el dominio de campos gravitatorios intensos); la mecánica cuántica y la teoría cuántica de campos extienden el conocimiento al dominio de las distancias cortas. Los conceptos que invocan estas teorías y las características que revelan son diferentes de cualquier cosa anteriormente imaginada. Pese a todo, apliquemos estas teorías en los dominios familiares de velocidades, tamaños y masas cotidianas, y se reducen a las descripciones elaboradas antes del siglo XX: la mecánica clásica de Newton y los campos clásicos de Faraday, Maxwell y otros.

La teoría de cuerdas es potencialmente el próximo y último paso en este avance.[51] En un marco *único*, maneja los dominios reclamados por la relatividad y el cuanto. Además, y hay que agarrarse para oírlo, la teoría de cuerdas lo hace de una manera que engloba por completo todos los descubrimientos que la precedían. Podría parecer que una teoría basada en filamentos vibrantes no tiene mucho en común con la imagen de la gravedad como espacio-tiempo curvo de la relatividad general. Sin embargo, apliquemos las matemáticas de la teoría de cuerdas a una situación en donde la gravedad importa pero la mecánica cuántica no es relevante (a un objeto masivo, como el Sol, cuyo tamaño es grande), y surgirán las ecuaciones de Einstein. Asimismo, filamentos vibrantes y partículas puntuales son completamente diferentes. Pero apliquemos las matemáticas de la teoría de cuerdas a una situación en donde la mecánica cuántica importa pero no la gravedad (a pequeños conjuntos de cuerdas que no están vibrando rápidamente, ni se mueven deprisa ni es-

tán muy estiradas; tienen baja energía —o lo que es equivalente, baja masa—, de modo que la gravedad no desempeña prácticamente ningún papel) y las matemáticas de la teoría de cuerdas se transmutan en las matemáticas de la teoría cuántica de campos.

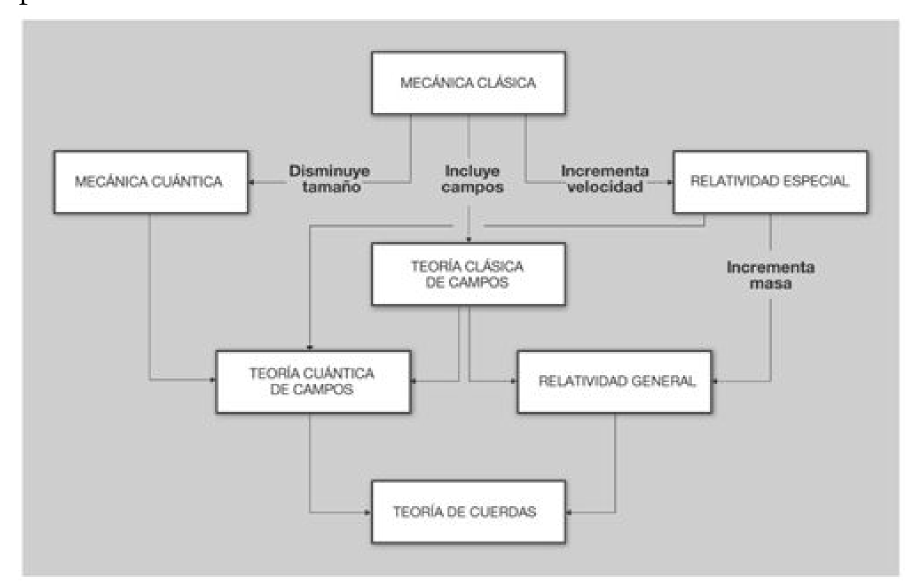


FIGURA 4.3. Una representación gráfica de las relaciones entre los más importantes desarrollos teóricos en física. Históricamente, las nuevas teorías satisfactorias han extendido el dominio del conocimiento (a velocidades más rápidas, masas mayores, distancias más cortas), aunque se reducen a las previas teorías cuando se aplican en circunstancias físicas menos extremas. La teoría de cuerdas encaja en esta pauta de progreso: extiende el dominio del conocimiento aunque, en escenarios apropiados, se reduce a la relatividad general y la teoría cuántica de campos.

Esto se resume gráficamente en la Figura 4.3, que muestra las conexiones lógicas entre las teorías importantes que han desarrollado los físicos desde la época de Newton. La teoría de cuerdas podría haber requerido una ruptura con el pasado. Podría haberse salido del diagrama que presenta la figura. Lo destacable es que no lo hace. La teoría de cuerdas es suficiente-

mente revolucionaria como para trascender las barreras que limitaban la física del siglo XX. Pese a todo, la teoría es suficientemente conservadora como para permitir que los últimos trescientos años de descubrimiento se acomoden perfectamente dentro de sus matemáticas.

Las dimensiones del espacio

Vayamos ahora a algo más extraño. El paso de puntos a filamentos es sólo parte del nuevo marco introducido por la teoría de cuerdas. En los primeros días de investigación en teoría de cuerdas, los físicos encontraron perniciosos defectos matemáticos (llamados *anomalías cuánticas*) que implicaban procesos inaceptables como la espontánea creación o destrucción de energía. Normalmente, cuando aparecen problemas de este tipo en una teoría propuesta los físicos responden de forma clara y rápida: descartan la teoría. De hecho, muchos en los años setenta pensaban que esto era lo mejor que se podía hacer con las cuerdas. Pero los pocos investigadores que siguieron en la carrera dieron con una forma de proceder alternativa.

En un desarrollo deslumbrante descubrieron que los aspectos problemáticos estaban relacionados con el número de dimensiones del espacio. Sus cálculos revelaron que si el universo tuviera más de las tres dimensiones de la experiencia cotidiana —más que las familiares izquierda/derecha, delante/detrás y arriba/abajo— podrían depurarse las características problemáticas de las ecuaciones de la teoría de cuerdas. En concreto, en un universo con nueve dimensiones de espacio y una de tiempo, para dar un total de diez dimensiones espacio-temporales,

las ecuaciones de la teoría de cuerdas quedaban libres de problemas.

Me gustaría explicar cómo se produjo esto sin utilizar términos técnicos, pero no puedo, y nunca he encontrado a nadie que pueda hacerlo. Lo intenté en *El universo elegante*, pero ese tratamiento sólo describe, en términos generales, cómo afecta el número de dimensiones a aspectos de las vibraciones de cuerdas, y no explica de dónde sale el número concreto de diez. Por eso, en una línea ligeramente técnica, la clave matemática es ésta. Hay una ecuación en la teoría de cuerdas que tiene una contribución de la forma $(D - 10)$ multiplicado por (*Problema*), donde D representa el número de dimensiones espacio-temporales y *Problema* es una expresión matemática que da lugar a fenómenos físicos problemáticos tales como la violación de la conservación de la energía antes mencionada. Con respecto a por qué la ecuación toma esa forma precisa, no puedo ofrecer ninguna explicación intuitiva y no técnica. Pero si usted hace el cálculo, a eso es a lo que llevan las matemáticas. Ahora bien, la observación clave, aunque simple, es que si el número de dimensiones espacio-temporales es diez, y no las cuatro que esperamos, la contribución es 0 multiplicado por *Problema*. Y puesto que 0 multiplicado por cualquier cosa es 0, en un universo con diez dimensiones espacio-temporales el problema desaparece. Así funcionan las matemáticas. Realmente. Y por eso es por lo que los teóricos de cuerdas defienden un universo con más de cuatro dimensiones espacio-temporales.

Incluso así, por muy abierto que pueda estar a seguir la ruta marcada por las matemáticas, si usted no ha encontrado nunca la idea de dimensiones extra, la posibilidad puede sonar como una locura. Las dimensiones del espacio no se pierden como la llave del coche o como un calcetín de su par preferido. Si hubiera en el universo más que longitud, anchura y altura, alguien lo habría advertido. Bueno, no necesariamente. Ya en las prime-

ras décadas del siglo XX, una visionaria serie de artículos del matemático alemán Theodor Kaluza y el físico sueco Oskar Klein sugería que podría haber dimensiones que eludían ser detectadas. Sus trabajos concebían que a diferencia de las dimensiones espaciales familiares que se extienden sobre distancias grandes, posiblemente infinitas, pudiera haber dimensiones adicionales que son minúsculas y están enrolladas, lo que las hace difícil de ver.

Para representar esto, piense en una pajilla de las que se utilizan para beber. Pero para nuestro fin presente, hagámosla decididamente poco normal imaginándola tan delgada como es lo usual pero tan larga como el Empire State. La superficie de la pajilla larga (como la de cualquier pajilla) tiene dos dimensiones: una es la dimensión vertical larga; la otra es la dimensión circular corta, que se enrolla alrededor de la pajilla. Ahora imagine que ve la larga pajilla desde la otra orilla del río Hudson, como en la Figura 4.4a. Puesto que la pajilla es muy fina, parece una línea vertical que se estira desde el suelo hasta el cielo. A esa distancia, usted no tiene la agudeza visual necesaria para ver la minúscula dimensión circular de la pajilla, incluso si existe en cada punto a lo largo de la extensión vertical de la pajilla. Esto le lleva a pensar, incorrectamente, que la superficie de la pajilla es unidimensional, y no bidimensional.[52]

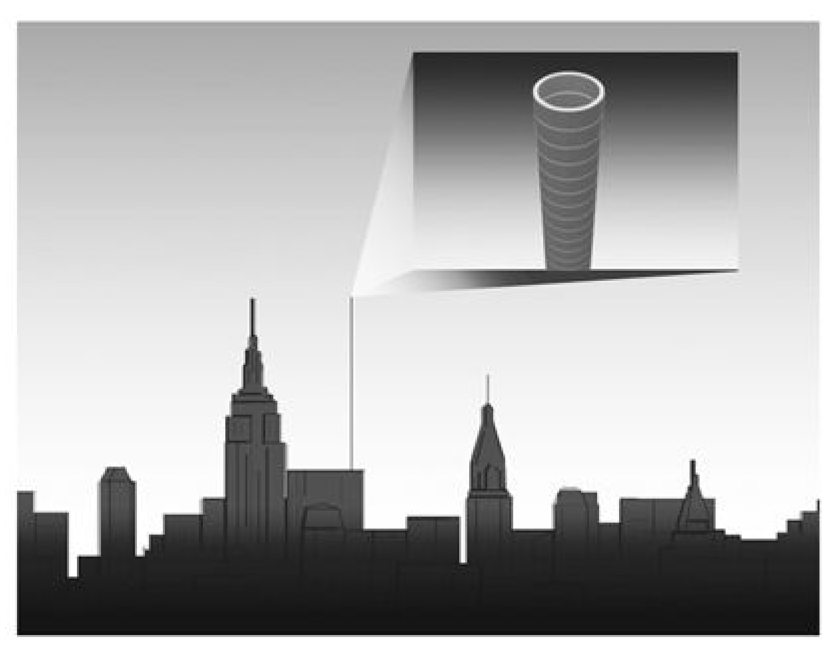
Para tener otra visualización, piense en una enorme alfombra que cubre las llanuras saladas de Utah. Desde un avión, la alfombra parece una superficie plana con dos dimensiones que se extienden de norte a sur y de este a oeste. Pero después de tirarse en paracaídas y ver la alfombra de cerca, usted se da cuenta de que su superficie está compuesta de un denso entramado: minúsculos lazos de algodón unidos a cada punto de la alfombra plana. La alfombra tiene dos dimensiones grandes y fáciles de ver (norte/sur y este/oeste), pero también una di-

mensión pequeña (los lazos circulares) que es más difícil de detectar (Figura 4.4b).

La propuesta de Kaluza-Klein sugería que una distinción similar, entre dimensiones que son grandes y fáciles de ver, y otras que son minúsculas y por ello más difíciles de revelar, podría aplicarse al propio tejido del espacio. La razón de que todos seamos conscientes de las tres dimensiones familiares del espacio sería que su extensión, como la dimensión vertical de la pajilla y las dimensiones norte/sur y este/oeste de la alfombra, es enorme (posiblemente infinita). Sin embargo, si una dimensión extra del espacio estuviera enrollada como la parte circular de la pajilla o la alfombra, pero de un tamaño extraordinariamente pequeño —millones o incluso miles de millones de veces más pequeña que un átomo—, podría ser tan ubicua como las familiares dimensiones desplegadas y pese a todo permanecer más allá de nuestra capacidad para detectarlas incluso con los más potentes aparatos de amplificación actuales. La dimensión pasaría desapercibida. Tal fue el comienzo de la *teoría de Kaluza-Klein*, la proposición de que nuestro universo tiene dimensiones espaciales más allá de las tres de la experiencia cotidiana (Figura 4.5).

Esta línea de pensamiento establece que la sugerencia de dimensiones espaciales «extra», por poco familiar que sea, no es absurda. Ése es un buen punto de partida, pero invita a una pregunta esencial: ¿por qué, ya en los años veinte, alguien invocaría una idea tan exótica? La motivación de Kaluza procedía de una idea que había tenido poco después de que Einstein publicara la teoría de la relatividad general. Él encontró que de un plumazo —literalmente— podía modificar las ecuaciones de Einstein para hacerlas aplicables a un universo con una dimensión espacial adicional. Y cuando analizó estas ecuaciones modificadas, los resultados fueron tan sorprendentes que, como ha contado su hijo, Kaluza abandonó su conducta normalmente

reservada, se puso a dar golpes en su mesa de trabajo con ambas manos, se levantó y se puso a cantar un aria de *Las bodas de Fígaro*.[53] Dentro de las ecuaciones modificadas, Kaluza encontró las que Einstein ya había utilizado con éxito para describir la gravedad en las tres dimensiones de espacio y una de tiempo familiares. Pero puesto que su nueva formulación incluía una dimensión de espacio adicional, Kaluza encontró una ecuación adicional. Y por si fuera poco, *cuando Kaluza dedujo esta ecuación la reconoció como la misma que Maxwell había descubierto medio siglo antes para describir el campo electromagnético*.



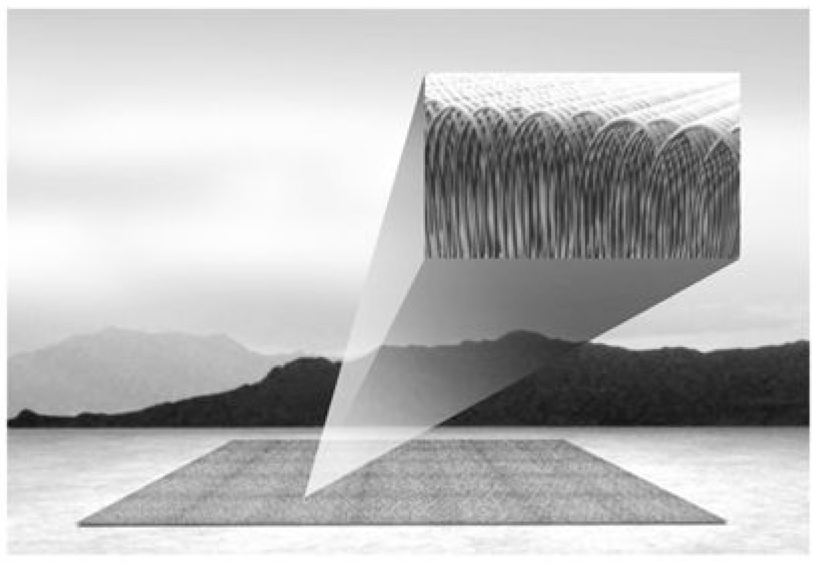


FIGURA 4.4. (a) La superficie de una pajilla larga tiene dos dimensiones; la dimensión vertical es larga y fácil de ver, mientras que la dimensión circular es pequeña y más difícil de detectar. (b) Una alfombra gigantesca tiene tres dimensiones; las dimensiones norte/sur y este/oeste son grandes y fáciles de ver, mientras que la

parte circular, el pelo de la alfombra, es pequeña y por consiguiente más difícil de detectar.

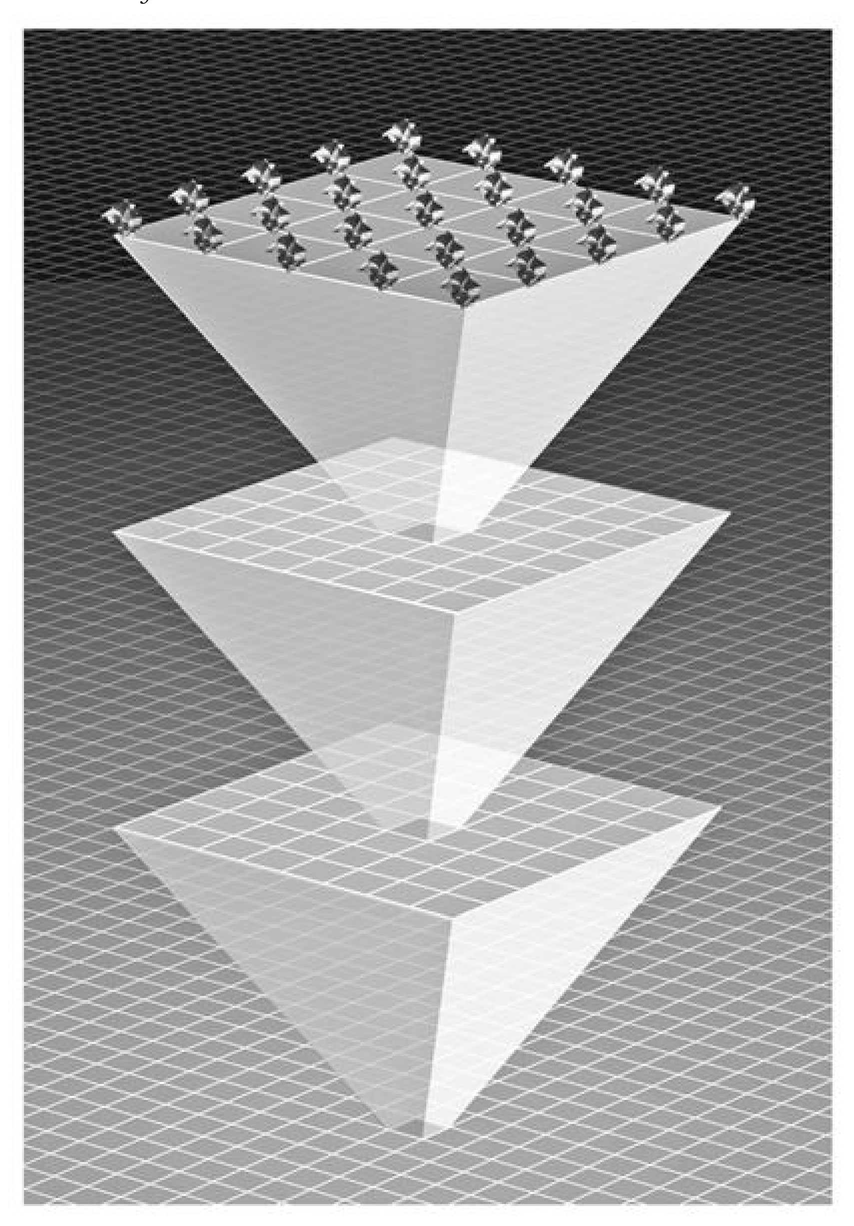


FIGURA 4.5. La teoría de Kaluza-Klein postula minúsculas dimensiones espaciales extra ligadas a cada punto en las tres grandes dimensiones espaciales familiares. Si pudiéramos ampliar

suficientemente el tejido espacial, las hipotéticas dimensiones extra se harían visibles. (Para una mejor claridad visual, en la ilustración las dimensiones extra sólo están ligadas a puntos de una malla).

Kaluza reveló que en un universo con una dimensión espacial adicional, gravedad y electromagnetismo pueden describirse a la vez en términos de rizos espaciales. La gravedad riza las tres dimensiones espaciales familiares, mientras que el electromagnetismo riza la cuarta. Un problema importante con la propuesta de Kaluza era explicar por qué no vemos esta cuarta dimensión espacial. Aquí es donde Klein dejó su impronta al sugerir la solución arriba explicada: dimensiones más allá de las que experimentamos directamente pueden eludir nuestros sentidos y nuestros aparatos si son suficientemente pequeñas.

En 1919, después de conocer la propuesta de dimensiones extra para la unificación, Einstein vaciló. Estaba impresionado por un marco que era un avance en su sueño de unificación, pero tenía dudas acerca de un enfoque tan extraño. Tras dos años de reflexión, durante los que retuvo la publicación del artículo de Kaluza, Einstein finalmente aceptó la idea y con el tiempo se convirtió en uno de los mejores campeones de las dimensiones espaciales ocultas. En su propia investigación hacia una teoría unificada volvió una y otra vez a este tema.

Pese a la bendición de Einstein, la investigación posterior demostró que el programa de Kaluza-Klein se enfrentaba a varios obstáculos: la mayor dificultad era su incapacidad para incorporar las propiedades detalladas de las partículas materiales, tales como los electrones, en su estructura matemática. Durante un par de décadas se exploraron vías ingeniosas para soslayar este problema, así como generalizaciones y modificaciones de la propuesta original de Kaluza-Klein, pero puesto que no surgió ningún marco libre de trampas, a mediados de los años cua-

renta la idea de unificación a través de dimensiones extra estaba básicamente abandonada.

Treinta años más tarde llegó la teoría de cuerdas. Más que permitir un universo con más de tres dimensiones, las matemáticas de la teoría de cuerdas lo *exigían*. Y así, la teoría de cuerdas ofreció un nuevo escenario a medida para invocar el programa de Kaluza-Klein. Ante la pregunta «Si la teoría de cuerdas es la tan deseada teoría unificada, entonces ¿por qué no hemos visto las dimensiones extra que necesita?», el eco de Kaluza-Klein resonaba a través de las décadas, respondiendo que las dimensiones están a nuestro alrededor pero son demasiado pequeñas para verse. La teoría de cuerdas resucitó el programa de Kaluza-Klein, y a mediados de los años ochenta investigadores en todo el mundo se inclinaban a creer que era sólo cuestión de tiempo —un corto tiempo, según los defensores más entusiastas— antes de que la teoría de cuerdas proporcionara una teoría completa de toda la materia y todas las fuerzas.

Grandes esperanzas

Durante los primeros días de la teoría de cuerdas, los avances se dieron a un ritmo tan rápido que era casi imposible estar al día de todos los desarrollos. Muchos comparaban la atmósfera a la de los años veinte, cuando los científicos se introducían en el dominio recién descubierto de lo cuántico. Con esa excitación es comprensible que algunos teóricos hablaran de una rápida solución a los problemas importantes de la física fundamental: la fusión de gravedad y mecánica cuántica; la unificación de todas las fuerzas de la naturaleza; una explicación de las propiedades de la materia; una determinación del número de

dimensiones espaciales; la elucidación de las singularidades de agujero negro; y el desvelamiento del origen del universo. Sin embargo, como previeron los investigadores más avezados, estas expectativas eran prematuras. La teoría de cuerdas es tan rica, tan amplia y tan matemáticamente difícil que la investigación hasta la fecha, casi tres décadas después de la euforia inicial, nos ha dejado a medias en el camino de la exploración. Y dado que el dominio de la gravedad cuántica es aproximadamente cien trillones de veces más pequeño que cualquier cosa a la que actualmente podamos acceder experimentalmente, las estimaciones razonables estiman que el camino será largo.

¿Dónde estamos? En lo que queda del capítulo revisaré el conocimiento más avanzado en varias áreas clave (salvando las relevantes para el tema de los universos paralelos para una discusión más detallada en capítulos posteriores), y valoraré los logros hasta la fecha y los retos aún pendientes.

La teoría de cuerdas y las propiedades de las partículas

Una de las preguntas más profundas de toda la física es por qué las partículas de la naturaleza tienen las propiedades que tienen. ¿Por qué, por ejemplo, tiene el electrón su masa concreta y el quark arriba su carga eléctrica concreta? La pregunta exige atención no sólo por su interés intrínseco, sino también por un hecho sugerente al que aludimos antes. Si las propiedades de las partículas fueran diferentes —si, por ejemplo, el electrón hubiera sido algo más pesado o algo más ligero, o si la repulsión eléctrica entre los electrones hubiera sido más fuerte o más débil—, los procesos nucleares que impulsan las estrellas como nuestro Sol se habrían interrumpido. Sin estrellas, el uni-

verso sería un lugar muy diferente.[54] Y lo más importante, sin el calor y la luz del Sol, la compleja cadena de sucesos que llevan a la vida en la Tierra no se habría producido.

Esto lleva a un gran desafío: utilizando papel, lápiz, posiblemente un ordenador, y la mejor comprensión de las leyes de la física, calcúlense las propiedades de las partículas y encuéntrense resultados en acuerdo con los valores medidos. Si pudiéramos afrontar este desafío, habríamos dado uno de los pasos más profundos hacia la comprensión de por qué el universo es como es.

En la teoría cuántica de campos, el desafío es insuperable. Permanentemente. La teoría cuántica de campos requiere como *input* las propiedades medidas de las partículas —estas características son parte de la definición de la teoría—, y así puede acomodar sin problemas un amplio abanico de valores para sus masas y cargas.[55] En un mundo imaginario donde la masa o la carga del electrón fuera mayor o menor que en el nuestro, la teoría cuántica de campos podría trabajar sin parpadear; simplemente sería cuestión de ajustar el valor de un parámetro dentro de las ecuaciones de la teoría.

¿Puede hacerlo mejor la teoría de cuerdas?

Una de las características más bellas de la teoría de cuerdas (y la faceta que más me impresionó cuando estudié el tema) es que las propiedades de las partículas están *determinadas por el tamaño y la forma de las dimensiones extra*. Puesto que las cuerdas son tan minúsculas, no sólo vibran dentro de las tres grandes dimensiones de la experiencia común; también vibran en las dimensiones minúsculas y enrolladas. Y de la misma forma que las corrientes de aire que fluyen a través de un instrumento de viento tienen pautas vibracionales dictadas por la forma geométrica del instrumento, las cuerdas en la teoría de cuerdas tienen pautas vibracionales dictadas por la forma geométrica de

las dimensiones enrolladas. Recordando que las pautas vibracionales de las cuerdas determinan propiedades de las partículas tales como masa y carga eléctrica, vemos que estas propiedades están determinadas por la geometría de las dimensiones extra.

Por ello, si usted conociera exactamente qué aspecto tienen las dimensiones extra de la teoría de cuerdas, estaría en el buen camino para predecir las propiedades detalladas de las cuerdas vibrantes, y con ello las propiedades detalladas de las partículas elementales que son vibraciones de cuerdas. El problema es, y lo ha sido durante un tiempo, que nadie ha sido capaz de imaginar la forma geométrica exacta de las dimensiones extra. Las ecuaciones de la teoría de cuerdas ponen restricciones matemáticas sobre la geometría de las dimensiones extra, pues les exige que pertenezcan a una clase particular llamada *formas de Calabi-Yau* (o, en la jerga matemática, *variedades de Calabi-Yau*), con los nombres de los matemáticos Eugenio Calabi y Shing-Tung Yau, quienes investigaron sus propiedades mucho antes de que se descubriera su importante papel en la teoría de cuerdas (Figura 4.6). El problema es que no hay una única forma de Calabi-Yau. En su lugar, como sucede con los instrumentos musicales, las formas se dan en una amplia variedad de tamaños y contornos. E igual que instrumentos diferentes generan sonidos diferentes, dimensiones extra que difieren en tamaño y forma (así como en lo que se refiere a aspectos más detallados a los que llegaremos en el próximo capítulo) generan diferentes pautas vibracionales de cuerdas y con ello diferentes conjuntos de propiedades de partículas. *La falta de una especificación única de las dimensiones extra es el principal obstáculo que impide a los teóricos de cuerdas hacer predicciones definitivas.*

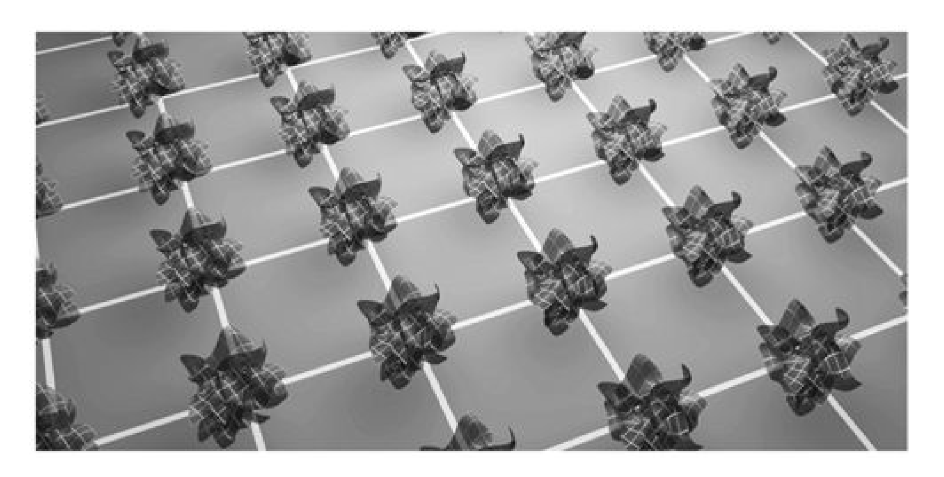


FIGURA 4.6. Un primer plano del tejido espacial en la teoría de cuerdas, que muestra un ejemplo de dimensiones extra enrolladas en una forma de Calabi-Yau. Como el pelo y el refuerzo de una alfombra, la forma de Calabi-Yau estaría ligada a cada punto en las tres grandes dimensiones espaciales familiares (representadas por la malla bi-dimensional), pero por claridad visual sólo se muestran las formas en puntos de una malla.

Cuando yo empecé a trabajar en la teoría de cuerdas, ya a mediados de los años ochenta, sólo había unas pocas formas de Calabi-Yau conocidas, de modo que se podía pensar en estudiar cada una de ellas en busca de alguna que encajara en la física conocida. Mi tesis doctoral fue uno de los primeros pasos en esta dirección. Pocos años después, cuando yo era un becario posdoctoral (que trabajaba para el Yau de Calabi-Yau), el número de formas de Calabi-Yau había aumentado hasta algunos millares, lo que representaba más de un problema para un análisis exhaustivo —pero para eso están los estudiantes graduados—. Sin embargo, a medida que pasaba el tiempo las páginas del catálogo de Calabi-Yau seguían multiplicándose; como veremos en el capítulo 5, ahora hay más de ellas que granos de arena en una playa. En todas las playas. En cualquier lugar. Muchas más. Analizar matemáticamente cada posibilidad para las dimensiones extra es algo impensable. Por consiguiente, los

teóricos de cuerdas han continuado la búsqueda de una directriz matemática salida de la teoría que pudiera seleccionar una forma de Calabi-Yau concreta como «la forma». Nadie lo ha conseguido hasta la fecha.

Y por eso, cuando se trata de explicar las propiedades de las partículas fundamentales, la teoría de cuerdas todavía no ha hecho honor a sus promesas. A este respecto, no ofrece hasta ahora ninguna mejora con respecto a la teoría cuántica de campos.[56]

Hay que tener en mente, no obstante, que lo que ha dado fama a la teoría de cuerdas es su capacidad para resolver el dilema central de la física del siglo XX: la rabiosa hostilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Dentro de la teoría de cuerdas, relatividad general y mecánica cuántica se unen armoniosamente. *Ahí* es donde la teoría de cuerdas ofrece un avance vital, que nos permite superar un obstáculo crítico imposible para los métodos estándar de la teoría cuántica de campos. Si una mejor comprensión de las matemáticas de la teoría de cuerdas nos capacitara para seleccionar una forma única para las dimensiones extra, una que además nos permitiera explicar todas las propiedades de las partículas observadas, eso sería un triunfo extraordinario. Pero no hay garantías de que la teoría de cuerdas pueda salvar el desafío. Tampoco es necesario que lo haga. La teoría cuántica de campos ha sido alabada con razón por ser enormemente satisfactoria, y pese a todo no puede explicar las propiedades de las partículas fundamentales. Si la teoría de cuerdas tampoco puede explicar las propiedades de las partículas pero va más allá de la teoría cuántica de campos en un aspecto clave, al englobar la gravedad, eso por sí solo sería un logro monumental.

De hecho, en el capítulo 6 veremos que en un cosmos repleto de mundos paralelos —como sugiere una lectura moderna de la teoría de cuerdas— quizá sea lisa y llanamente equivocado

esperar que las matemáticas seleccionen una forma única para las dimensiones extra. En su lugar, igual que las muchas formas diferentes del ADN proporcionan una abundante variedad de vida en la Tierra, también las muchas formas diferentes para las dimensiones extra pueden proporcionar la abundante variedad de universos que pueblan un multiverso basado en cuerdas.

Teoría de cuerdas y experimento

Si una cuerda típica es tan pequeña como sugiere la Figura 4.2, para sondear su estructura extendida —la característica que la distingue de un punto—, usted necesitaría un acelerador mil billones de veces más potente incluso que el Gran Colisionador de Hadrones. Utilizando la tecnología conocida, un acelerador semejante tendría que ser casi tan grande como la galaxia, y consumiría cada segundo energía suficiente para mover todo el mundo durante mil años. Salvo que se diera un avance tecnológico espectacular, esto asegura que con las energías relativamente bajas que pueden alcanzar nuestros aceleradores, las cuerdas aparecerían como si fueran partículas puntuales. Ésta es la versión experimental del hecho teórico que he resaltado antes: a bajas energías, las matemáticas de la teoría de cuerdas se transforman en las matemáticas de la teoría cuántica de campos. Y por ello, incluso si la teoría de cuerdas es la verdadera teoría fundamental, tomará la forma de la teoría cuántica de campos en un amplio abanico de experimentos accesibles.

Eso es bueno. Aunque la teoría cuántica de campos no está equipada para combinar la relatividad general y la mecánica cuántica, ni para predecir las propiedades fundamentales de las partículas de la naturaleza, puede explicar muchísimos otros re-

sultados experimentales. Lo hace tomando las propiedades medidas de las partículas como datos de entrada (entrada que dicta la elección de campos y curvas de energía en la teoría cuántica de campos) y luego utiliza las matemáticas de la teoría cuántica de campos para predecir cómo se comportarán dichas partículas en otros experimentos, generalmente en un acelerador. Los resultados son extraordinariamente precisos, y por eso es por lo que generaciones de físicos de partículas han hecho de la teoría cuántica de campos su aproximación primaria.

La elección de campos y curvas de energía en la teoría cuántica de campos es equivalente a la elección de la forma dimensional extra en la teoría de cuerdas. Sin embargo, el reto concreto al que se enfrenta la teoría de cuerdas es que las matemáticas que ligan las propiedades de las partículas (tales como sus masas y cargas) con la forma de las dimensiones extra son extraordinariamente complicadas. Esto hace difícil trabajar hacia atrás —utilizar datos experimentales como guía para la elección de dimensiones extra, de forma similar a como esos datos guían las elecciones de campos y curvas de energía en la teoría cuántica de campos—. Quizá algún día tengamos la destreza teórica para utilizar datos experimentales para fijar la forma de las dimensiones extra de la teoría, pero hoy no la tenemos.

Así pues, en un previsible futuro el camino más prometedor para vincular la teoría de cuerdas con los datos son las predicciones que, aunque abiertas a explicaciones que utilizan métodos más tradicionales, se explican de modo mucho más natural y convincente utilizando la teoría de cuerdas. Usted podría teorizar que yo estoy mecanografiando estas palabras con los dedos de los pies, pero una hipótesis mucho más natural y convincente —y que puedo dar fe de que es correcta— es que estoy utilizando los dedos de las manos. Consideraciones similares aplicadas a los experimentos resumidos en la Tabla 4.1 tie-

nen la capacidad para construir un argumento circunstancial a favor de la teoría de cuerdas.

Las tareas van desde experimentos en física de partículas en el Gran Colisionador de Hadrones (en busca de partículas supersimétricas y pruebas de dimensiones extra) hasta experimentos más modestos (medir la intensidad de la atracción gravitatoria en escalas de una millonésima de metro y menores), y a observaciones astronómicas (en busca de tipos concretos de ondas gravitatorias y pequeñas variaciones de temperatura en la radiación de fondo cósmico de microondas). La tabla explica las aproximaciones individuales, pero la valoración general es fácil de resumir. Una firma positiva en cualquiera de estos experimentos podría explicarse sin apelar a la teoría de cuerdas. Por ejemplo, aunque el marco matemático de la supersimetría (véase la primera entrada en la Tabla 4.1) fue descubierto inicialmente gracias a estudios teóricos de teoría de cuerdas, desde entonces ha sido incorporado en aproximaciones teóricas sin cuerdas. Descubrir partículas supersimétricas confirmaría así una pieza de la teoría de cuerdas, pero no constituiría una prueba decisiva. Del mismo modo, aunque las dimensiones espaciales extra tienen un hogar natural dentro de la teoría de cuerdas, hemos visto que también pueden ser parte de propuestas teóricas distintas —Kaluza, por ejemplo, no estaba pensando en la teoría de cuerdas cuando propuso la idea—. Por consiguiente, el producto más favorable de las aproximaciones en la Tabla 4.1 sería una serie de resultados positivos que mostrara cómo encajan las piezas del rompecabezas de la teoría de cuerdas. Como teclear con los dedos de los pies, las explicaciones que no utilizan cuerdas se harían muy complejas cuando se enfrentan a esa colección de resultados positivos.

TABLA 4.1. Experimentos y observaciones con la capacidad de relacionar la teoría de cuerdas con los datos.

Expe-	**Explicación**

rimento/observación	
Supersimetría	El «super» en la teoría de supercuerdas se refiere a supersimetría, una característica matemática con una implicación directa: por cada tipo de partícula conocido debería haber un tipo asociado que tiene las mismas propiedades en relación con las fuerzas eléctricas y nucleares. Los teóricos suponen que estas partículas han evitado hasta ahora la detección porque son más pesadas que sus contrapartidas conocidas, y por ello están más allá del alcance de los aceleradores utilizados hasta ahora. El Gran Colisionador de Hadrones quizá tenga energía suficiente para producirlos, de modo que hay previsiones de que podamos estar a punto de revelar la cualidad supersimétrica de la naturaleza.
Dimensiones extra y gravedad	Puesto que el espacio es el medio para la gravedad, más dimensiones suministran un dominio más grande dentro del que puede difundirse la gravedad. Y así como una gota de tinta se diluye más cuando se difunde en un recipiente de agua, la intensidad de la gravedad se diluiría cuando se difunde a través de las dimensiones adicionales —lo que ofrece una explicación de por qué la gravedad aparece débil (cuando usted levanta una taza de café, sus músculos vencen a la atracción gravitatoria de toda la Tierra)—. Si pudiéramos medir la intensidad de la gravedad a distancias más pequeñas que el tamaño de las dimensiones extra, la captaríamos antes de que se difunda por completo y con ello encontraríamos que su intensidad es mayor. Hasta ahora, las medidas en escalas tan cortas como una micra (10^{-6} metros) no han en-

	contrado ninguna desviación de las expectativas basadas en un mundo con tres dimensiones espaciales. Si se encontrara una desviación cuando los físicos lleven estos experimentos a distancias aún más cortas, eso proporcionaría una prueba convincente a favor de dimensiones adicionales.
Dimensiones extra y energía que falta	Si existen dimensiones extra pero son mucho menores que una micra, serán inaccesibles para experimentos que miden directamente la intensidad de la gravedad. Pero el Gran Colisionador de Hadrones ofrece otro medio de revelar su existencia. Los residuos creados por colisiones frontales entre protones a gran velocidad pueden ser expulsados de nuestras grandes dimensiones familiares y comprimidos en las otras (donde, por razones a las que llegaremos más adelante, los residuos se parecerían a las partículas de la gravedad, o gravitones). Si esto sucediera, los residuos llevarían energía, y como resultado nuestros detectores registrarían una energía algo menor después de la colisión que la que estaba presente antes. Estas señales de energía que falta podrían proporcionar pruebas sólidas de la existencia de dimensiones extra.
Dimensiones extra y miniagujeros negros	Los agujeros negros se describen normalmente como los remanentes de estrellas masivas que han agotado su combustible nuclear y han colapsado bajo su propio peso, pero ésta es una descripción indebidamente limitada. Cualquier objeto se convertiría en un agujero negro si se comprimiera suficientemente. Además, si hay dimensiones extra que hagan que la gravedad sea más intensa cuando actúa a distancias más cortas, sería más fácil encontrar agujeros negros, puesto que una fuerza gravitatoria más intensa implica que se necesita menos compresión para generar la misma atracción gravitatoria. Incluso sólo dos protones, si chocan a las velocidades que

	proporciona el Gran Colisionador de Hadrones, pueden acumular energía suficiente en un volumen suficientemente pequeño para desencadenar la formación de un agujero negro. Sería un agujero negro minúsculo, pero daría una firma inequívoca. El análisis matemático, que se remonta al trabajo de Stephen Hawking, muestra que agujeros negros minúsculos se desintegrarían rápidamente en un spray de partículas más ligeras cuyas trazas serían registradas por los detectores del colisionador.
Ondas gravitatorias	Aunque las cuerdas son minúsculas, si usted pudiera coger una de alguna manera, podría estirarla y hacerla más grande. Tendría que aplicar una fuerza superior a 10^{10} toneladas, pero estirar una cuerda es simplemente cuestión de ejercer la fuerza suficiente. Los teóricos han encontrado situaciones exóticas en las que la energía para dicho estiramiento la proporcionarían procesos astrofísicos, que generan largas cuerdas que cruzan el espacio. Incluso si estuvieran muy lejos, estas cuerdas podrían ser detectables. Los cálculos muestran que cuando vibra una cuerda larga, crea rizos en el espacio-tiempo —conocidos como ondas gravitatorias— de una forma muy característica, y así ofrecen una clara firma observacional. En las próximas décadas, si no antes, detectores muy sensibles basados en tierra y, si la financiación lo permite, en el espacio, quizá sean capaces de medir estos rizos.
Radiación cósmica de fondo de microondas	La radiación cósmica de fondo de microondas ya se ha mostrado capaz de sondear la física cuántica: las diferencias de temperatura medidas en la radiación surgen de fluctuaciones cuánticas estiradas por la expansión del espacio. (Recuerde la analogía con un mensaje minúsculo garabateado en un globo deshinchado que se hace visible una vez que el globo se ha inflado). En la inflación, el estiramiento del espacio es tan enorme que

incluso huellas minúsculas, quizá dejadas por cuerdas, también podrían ser estiradas lo suficiente como para ser detectables —quizá por el satélite Planck de la Agencia Espacial Europea. El éxito o el fracaso darán detalles de cómo se habrían comportado las cuerdas en los primeros momentos del universo— la naturaleza del mensaje que habrían impreso en el globo cósmico desinflado—. Se han desarrollado varias ideas y se han hecho algunos cálculos. Los teóricos esperan ahora que los datos hablen por sí mismos.

Los resultados experimentales negativos ofrecerían una información mucho menos útil. El fracaso en encontrar partículas supersimétricas podría significar que no existen, pero también podría significar que son tan pesadas que ni siquiera el Gran Colisionador de Hadrones puede producirlas; el fracaso en encontrar pruebas de dimensiones extra podría significar que no existen, pero también podría significar que son demasiado pequeñas para poder acceder a ellas con nuestra tecnología; el fracaso en encontrar agujeros negros microscópicos podría significar que la gravedad no se hace más intensa en escalas pequeñas, pero también podría significar que nuestros aceleradores son demasiado débiles para penetrar lo suficiente en el terreno microscópico donde el aumento en intensidad es sustancial; el fracaso en encontrar firmas de cuerdas en observaciones de ondas gravitatorias o en la radiación de fondo cósmico de microondas podría significar que la teoría de cuerdas es falsa, pero también podría significar que las firmas son demasiado tenues para que las puedan medir los equipos actuales.

Así pues, hoy por hoy es muy probable que los resultados experimentales más positivos no sean capaces de probar definitivamente que la teoría de cuerdas es correcta, mientras que muy probablemente los resultados negativos no serán capaces de mostrar que la teoría de cuerdas es falsa.[57] Pero no nos en-

gañemos. Si encontramos pruebas de dimensiones extra, supersimetría, miniagujeros negros, o cualquier otra de las firmas potenciales, eso sería un gran momento en la búsqueda de una teoría unificada. Reforzaría la confianza en que el camino matemático que hemos estado preparando apunta en la dirección correcta.

Teoría de cuerdas, singularidades y agujeros negros

En la inmensa mayoría de las situaciones, mecánica cuántica y gravedad se ignoran mutuamente, la primera aplicada a objetos pequeños como moléculas y átomos, y la segunda a objetos grandes como estrellas y galaxias. Pero las dos teorías están obligadas a romper su aislamiento en dominios conocidos como *singularidades*. Una singularidad es cualquier escenario físico, real o hipotético, que es tan extremo (masa enorme, tamaño pequeño, curvatura espacio-temporal muy grande, agujeros o remolinos en el tejido del espacio-tiempo) que mecánica cuántica y relatividad general se descontrolan y generan resultados similares a los mensajes de error que aparecen en la pantalla de una calculadora cuando se divide un número por cero.

Un ansiado logro de cualquier supuesta teoría de gravedad cuántica es unir mecánica cuántica y gravedad de una manera que elimine las singularidades. Las matemáticas resultantes nunca deberían dejar de ser válidas —ni siquiera en el momento del big bang o en el centro de un agujero negro,[58] y proporcionarían así una descripción razonable de situaciones que hace tiempo que desconciertan a los investigadores—. Aquí es donde la teoría de cuerdas ha hecho sus avances más impresionantes, controlando una lista creciente de singularidades.

A mediados de los años ochenta, el equipo formado por Lance Dixon, Jeff Harvey, Cumrun Vafa y Edward Witten se dio cuenta de que algunos agujeros en el tejido del espacio (conocidos como *singularidades orbifold*), que dejan las matemáticas de Einstein hechas jirones, no plantean problemas para la teoría de cuerdas. La clave de este éxito está en que mientras que las partículas puntuales pueden caer en agujeros, las cuerdas no pueden hacerlo. Puesto que las cuerdas son objetos extendidos, pueden chocar contra un agujero, pueden rodearlo o pueden quedarse adheridas, pero estas interacciones dejan las ecuaciones de la teoría de cuerdas perfectamente válidas. Esto es importante no porque tales rupturas en el espacio ocurran realmente —pueden o no pueden hacerlo—, sino porque la teoría de cuerdas está dando precisamente lo que buscamos en una teoría cuántica de la gravedad: un medio de dar sentido a una situación que está más allá de lo que relatividad general y mecánica cuántica pueden manejar por sí solas.

En los años noventa, el trabajo que hice en colaboración con Paul Aspinwall y David Morrison, y resultados independientes de Edward Witten, establecieron que singularidades aún más intensas (conocidas como *singularidades flop*) en las que una porción esférica de espacio está comprimida en un tamaño infinitesimal, también pueden ser manejadas por la teoría de cuerdas. El razonamiento intuitivo es que cuando una cuerda se mueve puede arrastrar el trozo de espacio comprimido como un *hula hoop* arrastra una burbuja de jabón, y así actúa como una barrera protectora que la rodea. Los cálculos mostraron que tal «escudo de cuerda» neutraliza cualquier potencial consecuencia desastrosa, lo que asegura que las ecuaciones de la teoría de cuerdas no sufren ningún efecto pernicioso —ningún error tipo «1 dividido por 0»— incluso si las ecuaciones de la relatividad general convencional se deshicieran.

En los años transcurridos desde entonces los investigadores han demostrado que también otras singularidades más complicadas (con nombres como *conifolds*, *orientifolds*, *enhancons*…) también están plenamente controladas dentro de la teoría de cuerdas. Así, hay una lista creciente de situaciones ante las que Einstein, Bohr, Heisenberg, Wheeler y Feynmann solo podrían decir «sencillamente no sabemos qué esta pasando», y para las que la teoría de cuerdas da una descripción completa y consistente.

Esto es un gran avance. Pero un desafío más para la teoría de cuerdas es eliminar las singularidades de agujeros negros y el big bang, que son más graves que las abordadas hasta ahora. Los teóricos habían dedicado muchos esfuerzos a tratar de alcanzar este objetivo, y han dado pasos importantes. Pero el resumen final es que todavía queda mucho camino antes de que estas singularidades, las más enigmáticas y relevantes, sean plenamente comprendidas.

Sin embargo, un avance importante ha iluminado un aspecto relacionado de los agujeros negros. Como discutiré en el capítulo 9, el trabajo de Jacob Bekenstein y Stephen Hawking en los años setenta estableció que los agujeros negros contienen una cantidad de desorden muy concreta, técnicamente conocida como *entropía*. Según la física básica, igual que el desorden dentro de un cajón de calcetines refleja las muchas reordenaciones casuales posibles de sus contenidos, el desorden de un agujero negro refleja las muchas reordenaciones casuales posibles de las interioridades del agujero negro. Pero por mucho que lo intentaran, los físicos fueron incapaces de entender los agujeros negros suficientemente bien como para identificar sus interioridades, y mucho menos analizar las formas posibles en que podían reordenarse. Los teóricos de cuerdas Andrew Strominger y Cumrun Vafa rompieron el *impasse*. Utilizando una mezcla de ingredientes fundamentales de la teoría de cuerdas

(algunos de los cuales encontraremos en el capítulo 5), crearon un modelo matemático para el desorden de un agujero negro, un modelo suficientemente transparente como para permitirles extraer una medida numérica de la entropía. El resultado que encontraron coincidía perfectamente con la respuesta de Bekenstein-Hawking. Aunque el trabajo dejó abiertas muchas cuestiones profundas (tales como la identificación explícita de los constituyentes microscópicos de un agujero negro), proporcionó la primera exposición mecano-cuántica firme del desorden de un agujero negro.[59]

Los notables avances en el tratamiento de estas singularidades y la entropía de los agujeros negros dan a la comunidad de los físicos una confianza bien fundada en que con el tiempo se vencerán los restantes retos de los agujeros negros y del big bang.

Teoría de cuerdas y matemáticas

Entrar en contacto con los datos, experimentales u observacionales, es la única forma de determinar si la teoría de cuerdas describe correctamente la naturaleza. Éste es un objetivo que se ha mostrado evasivo. Pese a todos sus avances, la teoría de cuerdas es aún una empresa totalmente matemática. Pero la teoría de cuerdas no es tan solo una consumidora de matemáticas. Algunas de sus contribuciones más importantes lo han sido *a* las matemáticas.

Es bien sabido que cuando estaba desarrollando la teoría de la relatividad general en los comienzos del siglo XX, Einstein se sumergió en los archivos matemáticos en busca de un lenguaje riguroso para describir el espacio-tiempo curvo. Las ideas geo-

métricas anteriores de matemáticos tales como Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann y Nikolai Lobachevsky proporcionaron una base importante para su éxito. En cierto sentido, al impulsar el desarrollo de nuevas matemáticas, la teoría de cuerdas está ayudando ahora a pagar la deuda intelectual de Einstein. Hay numerosos ejemplos, pero permítame dar uno que capta el sabor de los logros matemáticos de la teoría de cuerdas.

La relatividad general estableció un vínculo estrecho entre la geometría del espacio-tiempo y la física que observamos. Las ecuaciones de Einstein, junto con la distribución de materia y energía en una región, dicen la forma resultante del espacio-tiempo. Diferentes entornos físicos (diferentes configuraciones de masa y energía) dan espacio-tiempos conformados de manera diferente; diferentes espacio-tiempos corresponden a entornos físicamente distintos. ¿Qué se sentiría al caer en un agujero negro? Calcúlese con la geometría espacio-temporal que Karl Schwarzschild descubrió en su estudio de soluciones esféricas de las ecuaciones de Einstein. ¿Y si el agujero negro está rotando a gran velocidad? Calcúlese con la geometría espacio-temporal que encontró en 1963 el matemático neozelandés Roy Kerr. En relatividad general, la geometría es el *yin* para el *yang* de la física.

La teoría de cuerdas da un giro a esta conclusión al establecer que puede haber formas *diferentes* para el espacio-tiempo que, sin embargo, dan descripciones de la realidad físicamente indistinguibles.

Veamos una forma de considerarlo. Desde la Antigüedad hasta la moderna era matemática, hemos modelado los espacios geométricos como colecciones de puntos. Una pelota de *ping-pong*, por ejemplo, es la colección de puntos que constituyen su superficie. Antes de la teoría de cuerdas, los constituyentes básicos de la materia también se modelaban como puntos,

partículas puntuales, y esta coincidencia de ingredientes básicos hablaba de un alineamiento entre geometría y física. Pero en teoría de cuerdas el ingrediente básico no es un punto. Es una cuerda. Esto sugiere que un nuevo tipo de geometría, basado no en puntos sino en lazos, debería estar asociada a la física de cuerdas. La nueva geometría se denomina *geometría de cuerdas*.

Para hacerse una idea de la geometría de cuerdas, imagine una cuerda que se mueve a través de un espacio geométrico. Advierta que la cuerda puede comportarse de forma muy parecida a una partícula puntual, deslizándose inocentemente de aquí para allí, chocando con las paredes, navegando por canales y valles, y así sucesivamente. Pero en ciertas situaciones, una cuerda puede hacer también algo nuevo. Imagine que el espacio (o un fragmento del espacio) tiene la forma de un cilindro. Una cuerda puede enrollarse alrededor de dicho fragmento de espacio, como una goma elástica estirada alrededor de una lata de cerveza, lo que da una configuración que simplemente es inaccesible para una partícula puntual. Tales cuerdas «enrolladas», y sus primas «desenrolladas», sondean un espacio geométrico de maneras diferentes. Si un cilindro se hiciera más grueso, una cuerda que lo rodeara responderá estirándose, mientras que una cuerda desenrollada que desliza sobre su superficie no lo hará. De este modo, cuerdas enrolladas o desenrolladas son sensibles a diferentes características de una forma a través de la cual se están moviendo.

Esta observación es de gran interés porque da lugar a una conclusión sorprendente y completamente inesperada. Los teóricos de cuerdas han encontrado pares especiales de formas geométricas para el espacio que tienen características completamente diferentes cuando cada una de ellas es sondeada por cuerdas desenrolladas. También tienen características completamente diferentes cuando son sondeadas por cuerdas enrolladas. Pero —y ésta es la conclusión— cuando se sondean de ambas

maneras, con cuerdas enrolladas y desenrolladas, las formas se hacen indistinguibles. Lo que cuerdas desenrolladas ven en un espacio, las cuerdas enrolladas lo ven en el otro, y viceversa, lo que identifica la imagen colectiva que sale de la física completa de la teoría de cuerdas.

Las formas que constituyen tales pares proporcionan una poderosa herramienta matemática. En relatividad general, si usted está interesado en una u otra característica física debe completar un cálculo matemático utilizando el único espacio geométrico relevante para la situación que se está estudiando. Pero en la teoría de cuerdas, la existencia de pares de formas geométricas físicamente equivalentes significa que usted tiene una nueva elección: puede realizar el cálculo necesario utilizando una u otra de las formas. Y lo extraordinario es que aunque usted tiene la garantía de obtener la misma respuesta utilizando una u otra, los detalles matemáticos en el camino hacia la respuesta pueden ser enormemente diferentes. En una variedad de situaciones, cálculos matemáticos abrumadoramente difíciles en una forma geométrica se traducen en cálculos extraordinariamente fáciles en la otra. Y cualquier marco que haga fáciles cálculos matemáticos difíciles es evidentemente de gran valor.

Con los años, matemáticos y físicos han tomado en préstamo este diccionario fácil-difícil para encarar varios problemas matemáticos sobresalientes. Uno del que yo estoy particularmente orgulloso tiene que ver con contar el número de esferas que pueden empaquetarse (de un modo matemático concreto) dentro de una forma de Calabi-Yau dada. Los matemáticos han estado interesados en esta cuestión durante mucho tiempo, pero encontraban que los cálculos eran impenetrables en todos los casos salvo en los más simples. Tome la forma de Calabi-Yau de la Figura 4.6. Cuando una esfera se empaqueta dentro de esta forma, puede enrollarse muchas veces alrededor de la porción del Calabi-Yau, igual que un lazo pueden enrollarse

muchas veces alrededor de un barril de cerveza. Así que, ¿de cuántas maneras se puede empaquetar una esfera en esta forma si se enrolla, digamos, cinco veces? Cuando se les hacía una pregunta como ésta, los matemáticos tenían que aclararse la garganta, se miraban los zapatos y se escapaban diciendo que tenían citas urgentes. La teoría de cuerdas allanó los obstáculos. Traduciendo tales cálculos en otros mucho más fáciles en una forma de Calabi-Yau emparejada, los teóricos de cuerdas dieron respuestas que dejaron perplejos a los matemáticos. ¿Número de esferas cinco-veces-enrolladas empaquetadas en el Calabi-Yau en la Figura 4.6? 229.305.888.887.625. ¿Y si las esferas se enrollan alrededor de sí mismas diez veces? 704.288.164.978.454. 686.113.488.249.750. ¿Y veinte veces? 53.126.882.649.923.577.113.917.814.483.472.714.066. 922.267.923.866.471.451.936.000.000. Estos números resultaron ser heraldos de un espectro de resultados que han abierto todo un nuevo capítulo en el descubrimiento matemático.[60]

Así pues, ofrezca o no la teoría de cuerdas una aproximación correcta para describir el universo físico, ya se ha establecido como una poderosa herramienta para investigar el universo matemático.

El estado de la teoría de cuerdas: una evaluación

Basada en las cuatro últimas secciones, la Tabla 4.2 ofrece un informe del estado de la teoría de cuerdas, incluidas algunas observaciones adicionales que no he citado explícitamente en el texto anterior. Da una imagen de una teoría en avance, que ha producido logros sorprendentes pero que aún no ha sido puesta a prueba en la escala más importante: la confirmación expe-

rimental. La teoría seguirá siendo una especulación hasta que se establezca un vínculo convincente con el experimento o la observación. Establecer dicho vínculo es el gran reto. Pero no es un reto que sea privativo de la teoría de cuerdas. Cualquier intento de unir gravedad y mecánica cuántica entra en un dominio que está mucho más allá del límite de la investigación experimental. Es un elemento esencial de asumir un objetivo tan sumamente ambicioso. Desplazar las fronteras fundamentales del conocimiento, buscando respuestas a algunas de las preguntas más profundas contempladas durante los últimos miles de años de pensamiento humano, es una empresa formidable, una empresa que no es probable que se complete de la noche a la mañana. No en un montón de décadas.

Al evaluar el panorama actual, muchos teóricos de cuerdas argumentan que el siguiente paso crucial es expresar las ecuaciones de la teoría en su forma más exacta, útil y general. Buena parte de la investigación durante las dos primeras décadas de la teoría, y hasta mediados de los años noventa, se realizó utilizando ecuaciones aproximadas que muchos estaban convencidos de que podrían revelar las características más generales de la teoría pero eran demasiado toscas para dar predicciones refinadas. Avances recientes, a los que ahora nos dirigiremos, han catapultado el conocimiento mucho más allá de lo que pudo conseguirse con los métodos aproximados. Aunque sigue sin haber predicciones definitivas, ha emergido una nueva perspectiva. Procede de una serie de avances fundamentales que ha abierto nuevos horizontes para las consecuencias potenciales de la teoría, entre las que hay nuevas variedades de mundos paralelos.

TABLA 4.2 Un informe sumario del estatus de la teoría de cuerdas.[61]

Objeti-	¿Se requiere el objetivo?	Estatus

vo		
Unir gravedad y mecánica cuántica	Sí. El objetivo primario es fusionar la relatividad general con la mecánica cuántica.	Excelente. Una gran riqueza de cálculos e ideas atestiguan el éxito de la teoría de cuerdas en fusionar relatividad general y mecánica cuántica.
Unificar todas las fuerzas	No. La unificación de la gravedad y la mecánica cuántica no requiere una unificación adicional con las otras fuerzas de la naturaleza.	Excelente. Aunque no sea requerido, una teoría completamente unificada ha sido durante mucho tiempo un objetivo de la investigación en física. La teoría de cuerdas consigue este objetivo al describir todas las fuerzas de la misma manera —sus quanta son cuerdas que ejecutan pautas vibracionales particulares—.
Incorporar los avances clave de la investigación	No. En principio, una teoría satisfactoria no tiene por qué parecerse a las teorías satisfactorias del pasado.	Excelente. Aunque el progreso no es necesariamente acumulativo, la historia muestra que normalmente lo es; usualmente las nuevas teorías satisfactorias engloban los éxitos pasados como casos límite. La teoría de cuerdas incorpora los avances clave esenciales de los marcos físicos previamente satisfactorios.

pasada		
Explicar las propiedades de las partículas	No. Es un noble objetivo, y si se consigue proporcionaría un profundo nivel de explicación — pero no se requiere de una teoría satisfactoria de la gravedad cuántica —.	Indeterminado; no hay predicciones. Yendo más allá de la teoría cuántica de campos, la teoría de cuerdas ofrece un marco para explicar las propiedades de las partículas. Pero hasta la fecha, este potencial sigue sin realizarse; las muchas formas posibles diferentes para las dimensiones extra implican muchas colecciones posibles diferentes de propiedades de partículas. No se dispone actualmente de medios para escoger una forma entre las muchas posibles.
Confirmación experimental	Sí. Es la única manera de determinar si una teoría es una descripción correcta de la naturaleza.	Indeterminado; no hay predicciones. Éste es el criterio más importante; hasta la fecha, la teoría de cuerdas no ha sido puesta a prueba sobre ello. Los optimistas esperan que experimentos en el Gran Colisionador de Hadrones y observaciones por telescopios a bordo de satélites tengan la capacidad de acercar mucho más la teoría de cuerdas a los datos. Pero no hay garantía de que la tecnología actual sea suficientemente refinada como para alcanzar este objetivo.
Eliminar singularidades	Sí. Una teoría cuántica de la gravedad daría sentido a las singularidades que aparecen en situaciones	Excelente. Tremendos progresos; muchos tipos de singularidades han sido resueltos por la teoría de cuerdas. La teoría aún tiene que abordar las singularidades de agujero negro y big bang.

	que son, al menos en principio, físicamente realizables.	
Entropía de agujero negro	Sí. La entropía de un agujero negro proporciona un contexto en el que se relacionan la relatividad general y la mecánica cuántica.	Excelente. La teoría de cuerdas ha tenido éxito en calcular explícitamente, y confirmar, la fórmula para la entropía propuesta en los años setenta.
Contribuciones matemáticas	No. No se requiere que teorías correctas de la naturaleza den ideas matemáticas.	Excelente. Aunque no se necesitan ideas matemáticas para validar la teoría de cuerdas, algunas ideas importantes han surgido de la teoría, lo que revela el profundo alcance de sus fundamentos matemáticos.

5

Universos suspendidos en dimensiones vecinas

Los multiversos brana y cíclico

Hace muchos años estaba una noche en mi despacho de la Universidad de Cornell componiendo el examen de física de primer año que iba a tener lugar la mañana siguiente. Puesto que era la clase con los alumnos más brillantes, yo quería hacerlo un poco más interesante poniéndoles un problema más desafiante. Pero era tarde y tenía hambre, así que en lugar de examinar con cuidado varias posibilidades, modifiqué rápidamente un problema estándar que la mayoría de ellos ya conocía, lo incluí en el examen y me fui a casa. (Poco importan los detalles, pero el problema tenía que ver con predecir el movimiento de una escalera, inclinada contra una pared, cuando pierde su apoyo y cae. Yo modifiqué el problema estándar haciendo que la densidad de la escalera variara a lo largo de su longitud). A la mañana siguiente, durante el examen, me senté para escribir las soluciones, y descubrí que mi modificación aparentemente modesta del problema lo había hecho extraordinariamente difícil. El problema original podía completarse en media página. El modificado me llevó seis páginas. Mi letra es grande, pero usted ya se ha hecho una idea de la situación.

Este pequeño episodio representa la regla antes que la excepción. Los problemas de los libros de texto son muy especiales, pues están cuidadosamente diseñados para que sean com-

pletamente solubles con un esfuerzo razonable. Pero modifiquemos sólo un poco los problemas del libro de texto, cambiando una hipótesis y desechando una simplificación, y rápidamente pueden hacerse complicados o intratables. Es decir, rápidamente pueden hacerse tan difíciles como analizar situaciones típicas en el mundo real.

El hecho es que, en su inmensa mayoría, los fenómenos, desde el movimiento de los planetas hasta las interacciones entre partículas, son demasiado complejos como para ser descritos matemáticamente con completa precisión. En su lugar, la tarea del físico teórico es imaginar qué complicaciones pueden descartarse en un contexto dado, lo que da una formulación matemática manejable que sigue recogiendo los detalles esenciales. Al predecir la trayectoria de la Tierra usted tendría que incluir necesariamente los efectos de la gravedad del Sol; si incluye también la de la Luna, tanto mejor, pero la complejidad matemática aumenta de forma significativa. (En el siglo XIX, el matemático francés Charles-Eugène Delaunay publicó dos volúmenes de novecientas páginas relacionados con las complejidades de la danza gravitatoria Sol-Tierra-Luna). Si usted trata de ir más allá y dar plena cuenta de la influencia de todos los demás planetas, el análisis se hace abrumador. Felizmente, para muchas aplicaciones se pueden descartar todas las influencias salvo la del Sol, puesto que el efecto de otros cuerpos en el sistema solar sobre el movimiento de la Tierra es puramente nominal. Estas aproximaciones ilustran mi afirmación anterior de que el arte de la física reside en decidir qué se puede ignorar.

Pero como saben bien quienes trabajan en física, la aproximación no es tan sólo un medio potente para avanzar; en ocasiones también lleva peligro. Complicaciones de mínima importancia para responder a una pregunta pueden tener a veces un impacto sorprendentemente importante en la respuesta a otra. Una única gota de lluvia apenas afectará al peso de una piedra.

Pero si la piedra se mantiene en el borde de un acantilado, esa gota de lluvia muy bien podría hacerla caer e iniciar una avalancha. Una aproximación que descarte la gota de lluvia pasaría por alto un detalle crucial.

A mediados de los años noventa, los teóricos de cuerdas descubrieron algo análogo a una gota de lluvia. Encontraron que varias aproximaciones matemáticas, ampliamente utilizadas para analizar la teoría de cuerdas, estaban pasando por alto una física vital. A medida que se fueron desarrollando métodos matemáticos más precisos, los teóricos de cuerdas pudieron ir finalmente más allá de las aproximaciones; cuando lo hicieron, salieron a la luz muchas características de la teoría que no habían sido previstas. Y entre éstas estaban nuevos tipos de universos paralelos; una variedad de ellos, en particular, puede ser la más accesible experimentalmente de todas ellas.

Más allá de las aproximaciones

Cada disciplina establecida importante de la física teórica —tal como la mecánica clásica, el electromagnetismo, la mecánica cuántica y la relatividad general— está definida por una ecuación, o un conjunto de ecuaciones central. (Usted no necesita conocer estas ecuaciones, pero yo he listado algunas de ellas en las notas.)[62] El problema es que en todas las situaciones, salvo las más simples, las ecuaciones son extraordinariamente difíciles de resolver. Por esta razón los físicos utilizan rutinariamente simplificaciones —como ignorar la gravedad de Plutón o tratar el Sol como si fuera perfectamente redondo—, lo que hace las matemáticas más fáciles y ponen al alcance las soluciones aproximadas.

Durante mucho tiempo, la investigación en teoría de cuerdas se ha enfrentado a desafíos aún mayores. Simplemente encontrar las ecuaciones centrales resultó tan difícil que los físicos sólo podían desarrollar versiones aproximadas. E incluso las ecuaciones aproximadas eran tan complicadas que los físicos tenían que hacer hipótesis simplificadoras para encontrar soluciones, con lo que la investigación se basaba en aproximaciones a aproximaciones. Durante los años noventa, sin embargo, la situación mejoró enormemente. En una serie de avances, varios teóricos de cuerdas demostraron cómo ir más allá de las aproximaciones, lo que ofreció una claridad y una intuición inigualadas.

Para hacerse una idea de estos avances importantes, imagine que Rafael está planeando jugar en los dos próximos sorteos de la lotería mundial semanal, y está calculando en voz alta las probabilidades de ganar. Dice a Alicia que puesto que él tiene una probabilidad de 1 en 1.000 millones cada semana, si juega los dos sorteos su probabilidad de ganar es 2 en 1.000 millones, 0,000000002. Alicia sonríe con malicia: «Bueno, eso está *cerca*, Rafael». «¿De verdad, listilla? ¿Qué quieres decir con *cerca*?». «Bien», dice ella, «tú la has sobreestimado. Si ganaras en el primer sorteo, jugar una segunda vez no aumentaría tus probabilidades de ganar, pues ya lo habrías hecho. Si ganas dos veces, tendrás más dinero, por supuesto, pero ya que que estás calculando las probabilidades de ganar, ganar la segunda lotería después de la primera sencillamente no cuenta. Por eso, para tener la respuesta precisa tendrías que restar las probabilidades de ganar en *ambos* sorteos —1 en 1.000 millones multiplicado por 1 en 1.000 millones, o 0,000000000000000001—. Esto da una probabilidad final de 0,000000001999999999. ¿Alguna pregunta, Rafael?».

Salvando la petulancia, el método de Alicia es un ejemplo de lo que los físicos llaman una *aproximación perturbativa*. Al hacer

un cálculo suele ser más fácil hacer una primera pasada que incorpora solamente las contribuciones más obvias —ése es el punto de partida de Rafael— y luego hacer una segunda pasada que incluye detalles más finos, modificando o «perturbando» la respuesta de la primera, como sucede con la contribución de Alicia. La aproximación se generaliza fácilmente. Si Rafael estuviera planeando jugar en los sorteos de las siguientes diez semanas, la aproximación en la primera pasada sugiere que su probabilidad de ganar es aproximadamente 10 en 1.000 millones, 0,00000001. Pero, como en el ejemplo anterior, esta aproximación no tiene en cuenta correctamente las ganancias múltiples. Cuando interviene Alicia, su segunda pasada daría cuenta de forma adecuada de los casos en los que Rafael gana dos veces —digamos, en la primera y segunda loterías, o en la primera y la tercera, o en la segunda y la cuarta—. Estas correcciones, como señaló Alicia, son proporcionales a 1 en 1.000 millones multiplicado por 1 en 1.000 millones. Pero hay también una probabilidad todavía menor de que Rafael gane tres veces. La tercera pasada de Alice también tiene eso en cuenta, lo que produce modificaciones proporcionales a 1 en 1.000 millones multiplicado por sí mismo tres veces, 0,000000000000000000000000001. La cuarta pasada hace lo mismo para una probabilidad aún menor de ganar cuatro sorteos, y así sucesivamente. Cada nueva contribución es mucho más pequeña que la anterior, de modo que en algún momento Alicia considera la respuesta suficientemente precisa y la deja ahí.

Los cálculos en física, y también en muchas otras ramas de la ciencia, proceden a menudo de una manera similar. Si usted está interesado en cuál es la probabilidad de que colisionen dos partículas que circulan en sentidos opuestos alrededor del Gran Colisionador de Hadrones, la primera pasada imagina que ellas chocan una vez y rebotan (donde «chocan» significa que no se

tocan directamente, sino que una única «bala» portadora de fuerza, tal como un fotón, sale de una y es absorbida por la otra). La segunda pasada toma en cuenta la probabilidad de que las partículas choquen dos veces (entre ellas se disparan dos fotones); la tercera pasada modifica las dos anteriores dando cuenta de la probabilidad de que las partículas choquen tres veces; y así sucesivamente (Figura 5.1). Como sucedía con la lotería, esta aproximación perturbativa funciona bien si la probabilidad de un número cada vez mayor de interacciones entre partículas —como la probabilidad de un número cada vez mayor de ganancias de lotería— disminuye rápidamente.

En el caso de la lotería, la disminución está determinada porque cada ganancia sucesiva viene con un factor de 1 en 1.000 millones. En el ejemplo de la física, está determinada porque cada choque sucesivo viene con un factor numérico, llamado *constante de acoplamiento*, cuyo valor recoge la probabilidad de que una partícula dispare una bala portadora de fuerzas y que la segunda partícula la reciba. Para partículas tales como electrones, gobernadas por la fuerza electromagnética, las medidas experimentales han determinado que la constante de acoplamiento, asociada con balas fotónicas, es aproximadamente 0.0073.[63] Para los neutrinos, gobernados por la fuerza nuclear débil, la constante de acoplamiento es aproximadamente 10^{-6}. Para los quarks, componentes de los protones que giran en el Gran Colisionador de Hadrones y cuyas interacciones están gobernadas por la fuerza nuclear fuerte, la constante de acoplamiento es algo menor que 1. Estos números no son tan pequeños como los de la lotería, pero si por ejemplo multiplicamos 0,0073 por sí mismo, el resultado se hace minúsculo rápidamente. Después de una interacción es aproximadamente 0,0000533, después de dos es aproximadamente 0,0000000389. Esto explica por qué los teóricos sólo raramente se toman la molestia de tener en cuenta electrones que colisionan entre sí muchas veces. Los cál-

culos que implican muchas colisiones son extraordinariamente complicados de realizar, y las contribuciones de resultantes son tan minúsculas que uno puede parar después de unos pocos fotones disparados y seguir obteniendo una respuesta extraordinariamente precisa.

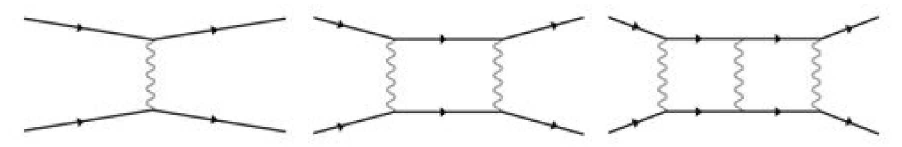


FIGURA 5.1. Dos partículas (representadas por las dos líneas continuas a la izquierda de cada diagrama) interactúan disparando varias «balas» de una a otra (las «balas» son partículas portadoras de fuerza, representadas por las líneas onduladas), y luego rebotan (las dos líneas continuas a la derecha). Cada diagrama contribuye a la probabilidad global de que las partículas colisionen. Las contribuciones de procesos son cada vez menores a medida que aumenta el número de balas.

Por supuesto, a los físicos les gustaría tener resultados exactos. Pero para muchos cálculos las matemáticas resultan demasiado difíciles, de modo que la aproximación perturbativa es lo mejor que podemos hacer. Afortunadamente, para constantes de acoplamiento suficientemente pequeñas los cálculos aproximados pueden dar predicciones que están en un acuerdo extraordinariamente bueno con los experimentos.

Una aproximación perturbativa similar ha sido durante mucho tiempo un pilar de la investigación en teoría de cuerdas. La teoría contiene un número, llamado *constante de acoplamiento de cuerdas* (*acoplamiento de cuerdas*, para abreviar), que gobierna la probabilidad de que una cuerda choque con otra. Si la teoría se muestra correcta, el acoplamiento de cuerdas también podrá medirse algún día, igual que las constantes antes enumeradas. Pero puesto que tal medida es de momento puramente hipotética, el valor del acoplamiento de cuerdas es totalmente desco-

nocido. Durante las últimas décadas, carentes de cualquier guía del experimento, los teóricos de cuerdas han hecho la hipótesis clave de que el acoplamiento de cuerdas es un número de valor pequeño. En cierto modo, esto ha sido como el borracho que busca sus llaves al pie de una farola, porque un acoplamiento de cuerdas pequeño permite a los físicos aprovechar en sus cálculos la luz del análisis perturbativo. Puesto que muchas aproximaciones satisfactorias anteriores a la teoría de cuerdas *sí* tienen un acoplamiento pequeño, una versión más favorable de la analogía apunta que el borracho está animado por el hecho de haber encontrado frecuentemente sus llaves en el lugar que está iluminado. De una forma o de otra, la hipótesis ha hecho posible una inmensa colección de cálculos matemáticos que no sólo han clarificado los procesos básicos de interacción entre cuerdas, sino que también han revelado muchas cosas sobre las ecuaciones fundamentales que subyacen en la disciplina.

Si el acoplamiento de cuerdas *es* pequeño, cabe esperar que estos cálculos aproximados reflejen con exactitud la física de la teoría de cuerdas. Pero ¿qué pasa si no lo es? A diferencia de lo que encontramos con la lotería y con los electrones que colisionan, un acoplamiento de cuerdas grande significaría que los sucesivos refinamientos de las aproximaciones en primer orden darían contribuciones cada vez mayores, de modo que nunca estaríamos justificados para detener un cálculo. Los miles de cálculos que han utilizado el esquema perturbativo no tendrían ninguna base; años de investigación colapsarían. Para aumentar los problemas, incluso con un acoplamiento de cuerdas pequeño pero moderado, también podría preocuparle que sus aproximaciones, al menos en algunas circunstancias, estuvieran pasando por alto fenómenos físicos sutiles pero vitales, como la gota de lluvia que cae en la piedra.

A principios de los años noventa no mucho se podía decir sobre estas cuestiones peliagudas. Pero en la segunda mitad de

la década, el silencio dio paso a un clamor. Los investigadores encontraron nuevos métodos matemáticos que podrían flanquear los métodos perturbativos sacando partido de algo llamado *dualidad*.

Dualidad

En los años ochenta, los teóricos se dieron cuenta de que no había una teoría de cuerdas, sino más bien cinco versiones diferentes, a las que dieron los nombres pegadizos de *Tipo I, Tipo IIA, Tipo IIB, Heterótica-O* y *Heterótica-E*. No he mencionado hasta este momento esta complicación porque aunque los cálculos establecían que las teorías difieren en los detalles, las cinco incluyen las mismas características generales —cuerdas vibrantes y dimensiones espaciales extra— en las que nos hemos centrado hasta aquí. Pero estamos ahora en un punto en donde las cinco variaciones de la teoría de cuerdas vienen a primer plano.

Durante muchos años los físicos se habían basado en métodos perturbativos para analizar cada una de las teorías de cuerdas. Cuando trabajaban con la teoría de cuerdas Tipo I suponían que su acoplamiento era pequeño, y procedían con cálculos multipaso similares a los que hacían Rafael y Alicia en el análisis de la lotería. Cuando trabajaban con la Heterótica-O, o cualquiera de las otras teorías de cuerdas, hacían lo mismo. Pero fuera de este dominio restringido de acoplamientos de cuerdas pequeños, los investigadores no podían hacer otra cosa que encogerse de hombros, levantar las manos al cielo y admitir que las matemáticas que estaban utilizando eran demasiado débiles como para dar una idea fiable.

Eso fue hasta la primavera de 1995, cuando Edward Witten sacudió a la comunidad de la teoría de cuerdas con una serie de impresionantes resultados. Utilizando ideas de Joe Polchinski, Michael Duff, Paul Townsend, Chris Hull, John Schwarz, Ashoke Sen y muchos otros, Witten ofreció pruebas convincentes de que los teóricos de cuerdas podían navegar con seguridad más allá de las orillas de acoplamientos pequeños. La idea central era simple y poderosa. Witten argumentaba que cuando la constante de acoplamiento en una cualquiera de las formulaciones de la teoría de cuerdas se hace cada vez mayor, la teoría —de forma extraordinaria— se transmuta en algo completamente familiar: una de las otras formulaciones de la teoría de cuerdas, pero con una constante de acoplamiento que se hace cada vez menor. Por ejemplo, cuando el acoplamiento de cuerdas Tipo I es grande, se transforma en la teoría de cuerdas Heterótica-O con un acoplamiento que es pequeño. Lo que significa que las cinco teorías de cuerdas no son diferentes después de todo. Cada una aparece diferente cuando se examina en un contexto limitado —valores pequeños de su constante de acoplamiento particular—, pero cuando se levanta esta restricción, cada teoría de cuerdas se transforma en las otras.

Recientemente encontré una espléndida imagen que vista de cerca parece Albert Einstein, desde una distancia un poco mayor se hace ambigua, y desde lejos se resuelve en Marilyn Monroe (Figura 5.2). Si usted viera solamente las imágenes que se dan en los dos extremos, tendría toda la razón para pensar que estaba mirando dos fotos diferentes. Pero si examina continuamente la imagen en el intervalo de distancias intermedias, encontrará inesperadamente que Einstein y Monroe son aspectos de un único retrato. Del mismo modo, un examen de dos teorías de cuerdas, en el caso extremo en que cada una de ellas tiene un acoplamiento pequeño, revela que son tan diferentes como Albert y Marilyn. Si usted se detuviera aquí, como durante

años hicieron los teóricos de cuerdas, habría concluido que estaba estudiando dos teorías de cuerdas independientes. Pero si examina las teorías cuando sus acoplamientos varían en el intervalo de valores intermedios, encontrará que, igual que Albert se convierte en Marilyn, cada una de ellas se transforma gradualmente en la otra.

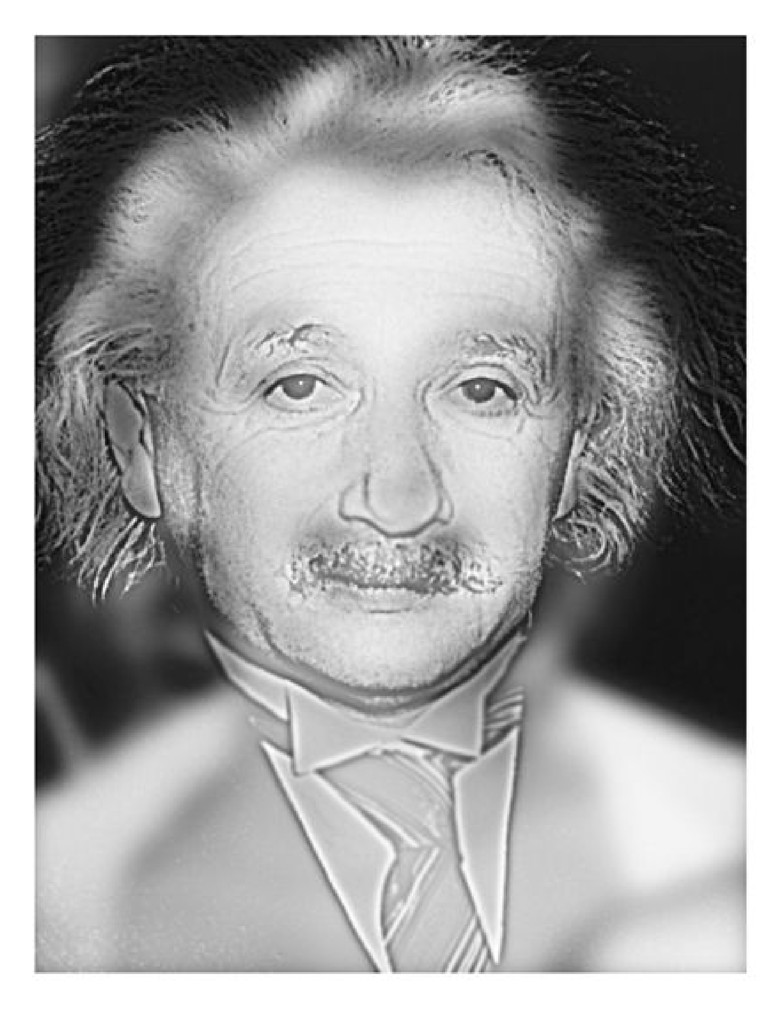


FIGURA 5.2. De cerca, la imagen se parece a Albert Einstein. De lejos, se parece a Marilyn Monroe. (La imagen fue creada por Aude Oliva, del Instituto de Tecnología de Massachusetts).

La mutación de Einstein en Marilyn es divertida. La mutación de una teoría de cuerdas en otra es transformativa. Implica que si los cálculos perturbativos en una teoría de cuerdas no pueden emprenderse porque el acoplamiento de dicha teoría es demasiado grande, los cálculos pueden ser traducidos fielmente al lenguaje de otra formulación de la teoría de cuerdas, una en la que una aproximación perturbativa es satisfactoria porque el acoplamiento es pequeño. Los físicos llaman *dualidad* a la transición entre teorías a primera vista distintas. Se ha convertido en uno de los temas más ubicuos en la investigación moderna en teoría de cuerdas. Al proporcionar dos descripciones matemáticas de una misma física, la dualidad duplica nuestro arsenal de cálculo. Cálculos que son imposiblemente difíciles desde una perspectiva se hacen perfectamente factibles desde otra.[64]

Witten argumentó, y desde entonces otros han completado detalles importantes, que las cinco teorías de cuerdas están relacionadas por una red de tales dualidades.[65] Su unión global, llamada *teoría-M* (enseguida veremos por qué), combina ideas de las cinco formulaciones empalmadas gracias a las diversas relaciones de dualidad, para ganar una comprensión más refinada de cada una de ellas. Una de estas ideas, fundamental para el tema que perseguimos, mostró que en la teoría de cuerdas hay mucho más que cuerdas.

Branas

Cuando empecé a estudiar la teoría de cuerdas me hice la misma pregunta que muchos me han hecho durante años: ¿por qué las cuerdas se consideran tan especiales? ¿Por qué nos fijamos solamente en ingredientes fundamentales que sólo tienen

longitud? Después de todo, la propia teoría requiere que el escenario dentro del que existen sus ingredientes —el universo espacial— tenga nueve dimensiones, así que ¿por qué no considerar entidades conformadas como láminas bidimensionales o gotas tridimensionales o sus parientes de dimensiones más altas? La respuesta que aprendí cuando era un estudiante graduado en los años ochenta, y que explicaba frecuentemente cuando daba clases sobre el tema a mediados de los noventa, era que las matemáticas que describen constituyentes fundamentales con más de una dimensión espacial adolecían de inconsistencias fatales (tales como procesos cuánticos que tendrían probabilidades negativas, un resultado matemáticamente absurdo). Pero cuando las mismas matemáticas se aplicaban a cuerdas, las inconsistencias se anulaban, lo que dejaba una descripción aceptable.[66],[67] Las cuerdas eran definitivamente una clase especial.

O así lo parecía.

Armados con los nuevos métodos de cálculo, los físicos empezaron a analizar sus ecuaciones con mucho más detalle y obtuvieron un abanico de resultados inesperados. Uno de los más sorprendentes establecía que el argumento para excluir cualquier cosa que no fueran cuerdas era defectuoso. Los teóricos se dieron cuenta de que los problemas matemáticos que encontraban al estudiar ingredientes de más altas dimensiones, tales como discos o gotas, eran artificios de las aproximaciones que se estaban utilizando. Utilizando los métodos más precisos, un pequeño ejército de teóricos estableció que ingredientes con diversos números de dimensiones espaciales se ocultan en las sombras matemáticas de la teoría de cuerdas.[68] Las técnicas perturbativas eran demasiado toscas para hacer visibles estos ingredientes, pero los nuevos métodos podían hacerlo. A finales de los años noventa estaba meridianamente claro que la teoría de cuerdas no era tan sólo una teoría que contenía cuerdas.

Los análisis revelaron objetos, conformados como discos o alfombras voladoras, con dos dimensiones espaciales: *membranas* (un significado de la «M» de la teoría-M), también llamadas *dos-branas*. Pero había más. Los análisis revelaron objetos con tres dimensiones espaciales, denominados *tres-branas*; objetos con cuatro dimensiones espaciales, *cuatro-branas*, y así sucesivamente, hasta llegar a *nueve-branas*. Las matemáticas dejaban claro que todas estas entidades podían vibrar y oscilar, igual que las cuerdas; de hecho, en este contexto, es mejor considerar las cuerdas como *uno-branas* —una única entrada en una lista inesperadamente larga de los constituyentes básicos de la teoría—.

Una revelación relacionada, igual de sorprendente para los que habían pasado la mayor parte de su vida profesional trabajando en el tema, era que el número de dimensiones espaciales que requiere la teoría no es nueve realmente. Es diez. Y si las combinamos con la dimensión del tiempo, el número total de dimensiones espacio-temporales es once. ¿Cómo podía ser? Recuerde la consideración «$(D - 10)$ multiplicado por *Problema*» mencionada en el capítulo 4, subyacente tras la conclusión de que la teoría de cuerdas necesita diez dimensiones espacio-temporales. El análisis matemático que generaba esta ecuación estaba basado, una vez más, en un esquema de aproximación perturbativa que suponía que el acoplamiento de cuerdas era pequeño. Sorpresa, sorpresa, esa aproximación perdía una de las dimensiones espaciales de la teoría. Witten demostró que la razón es que el tamaño del acoplamiento de cuerdas controla directamente el tamaño de la hasta ahora desconocida décima dimensión espacial. Al tomar el acoplamiento pequeño, los investigadores también habían hecho sin querer esta dimensión espacial pequeña, tan pequeña como para ser invisible a las propias matemáticas. Los métodos más precisos rectificaron este fallo, revelando un universo teoría-M/de cuerdas con diez di-

mensiones de espacio y una de tiempo, para dar un total de once dimensiones espacio-temporales.

Recuerdo muy bien las miradas de asombro en la conferencia internacional de teoría de cuerdas, celebrada en la Universidad del Sur de California en 1995, en la que Witten anunció por primera vez algunos de estos resultados, el inicio de lo que ahora se llama la segunda revolución en la teoría de cuerdas.[69] Para la historia del multiverso son las branas las que resultan fundamentales. Utilizándolas, los investigadores han sido llevados de la mano a otra variedad de universos paralelos.

Branas y mundos paralelos

Normalmente imaginamos que las cuerdas son ultrapequeñas; esa misma característica hace que poner a prueba la teoría sea un gran desafío. Sin embargo, advertí en el capítulo 4 que las cuerdas no son necesariamente minúsculas. Más bien, la longitud de una cuerda está controlada por su energía. Las energías asociadas con las masas de electrones, quarks y otras partículas conocidas son tan minúsculas que las cuerdas correspondientes serían de hecho minúsculas. Pero inyecte energía suficiente en una cuerda y podría hacer que se estire mucho. Estamos muy lejos de la capacidad de hacer esto aquí en la Tierra, pero ésa es una limitación de nuestro desarrollo tecnológico. Si la teoría de cuerdas es correcta, una civilización avanzada sería capaz de estirar las cuerdas hasta cualquier tamaño que quisiera. Los fenómenos cosmológicos naturales también tienen la capacidad de producir cuerdas largas; por ejemplo, las cuerdas pueden enrollarse alrededor de una porción de espacio y verse atrapadas en la expansión cosmológica, lo que las estira.

Una de las posibles firmas experimentales esbozadas en la Tabla 4.1 busca las ondas gravitatorias que quizá emitan las cuerdas largas cuando vibran muy lejos en el espacio.

Como las cuerdas, las branas de dimensiones más altas pueden ser grandes. Y esto abre una manera completamente nueva en la que la teoría de cuerdas puede describir el cosmos. Para entender lo que quiero decir, imagine primero una cuerda larga, tan larga como un cable de un tendido eléctrico que llega hasta donde alcanza la vista. A continuación, imagine una dos-brana grande, como un enorme mantel o una bandera gigantesca, cuya superficie se extiende indefinidamente. Ambas son fáciles de visualizar porque podemos imaginarlas localizadas dentro de las tres dimensiones de la experiencia común.

Si una tres-brana es enorme, quizá infinitamente grande, la situación cambia. Una tres-brana de este tipo *llenaría* el espacio que ocupamos, como el agua que llena una enorme pecera. Esta ubicuidad sugiere que mejor que considerar la tres-brana como un objeto que resulta estar situado dentro de nuestras tres dimensiones espaciales, deberíamos concebirla como el sustrato del propio espacio. Así como los peces viven en el agua, nosotros vivimos en una tres-brana que llena el espacio. El espacio, al menos el espacio que directamente habitamos, sería mucho más corpóreo que lo generalmente imaginado. El espacio sería una cosa, un objeto, una entidad: una tres-brana. Cuando corremos y andamos, cuando vivimos y respiramos, nos movemos en y a través de una tres-brana. Los teóricos de cuerdas llaman a esto el *escenario mundobrana*.

Aquí es donde los universos paralelos hacen su entrada como cuerdas.

Me he centrado en las relaciones entre tres-branas y tres dimensiones espaciales porque quería entrar en contacto con el reino familiar de la realidad cotidiana. Pero en la teoría de cuer-

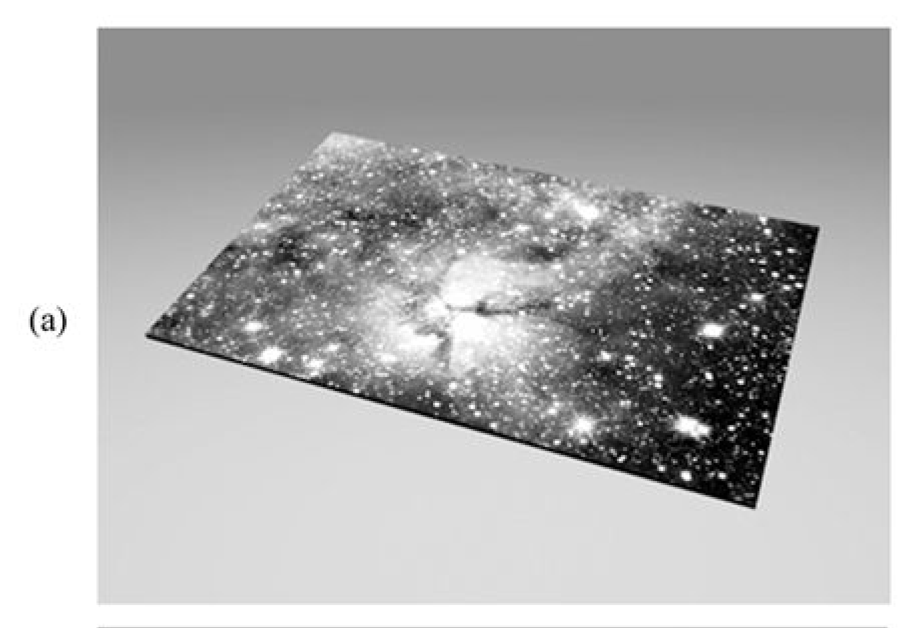
das hay más que tres dimensiones espaciales. Y una extensión a dimensiones más altas ofrece amplio lugar para acomodar más de una tres-brana. Partiendo de una posición conservadora, imaginemos que hay dos enormes tres-branas. Quizá usted encuentre difícil imaginarlo. Para mí ciertamente lo es. La evolución nos ha preparado para identificar objetos que presentan tanto oportunidades como peligros y que se sitúan perfectamente dentro del espacio tridimensional. Por consiguiente, aunque podemos imaginar fácilmente dos objetos tridimensionales ordinarios habitando en una región del espacio, pocos de nosotros podemos representarnos dos entidades tridimensionales coexistentes pero separadas, cada una de las cuales podría llenar por completo el espacio tridimensional. Así pues, para facilitar la discusión del escenario mundobrana, suprimamos una dimensión espacial en nuestra visualización y consideremos la vida en una dos-brana gigante. Y para una imagen mental definida, pensemos en la dos-brana como una rebanada de pan gigante y extraordinariamente fina.[70]

Para utilizar esta metáfora de un modo efectivo, imagine que la rebanada de pan incluye la totalidad de lo que tradicionalmente hemos llamado el universo —las nebulosas Orión, Cabeza de Caballo y del Cangrejo; la Vía Láctea entera; las galaxias Andrómeda, el Sombrero y el Torbellino, y demás—, todo lo que hay dentro de nuestra extensión espacial tridimensional, por distante que esté, como se esboza en la Figura 5.3a. Para visualizar una segunda tres-brana sólo tenemos que imaginar una segunda enorme rebanada de pan. ¿Dónde? Colóquela próxima a la nuestra, sólo ligeramente desplazada en las dimensiones extra (Figura 5.3b). Visualizar tres o cuatro o cualquier otro número de tres-branas es igualmente fácil. Simplemente añada rebanadas a la barra de pan cósmica. Y aunque la metáfora de la barra de pan resalta una colección de branas todas alineadas, es fácil imaginar posibilidades aún más generales. Las

branas pueden estar orientadas en cualquier dirección, e igualmente pueden incluirse branas de cualquier otra dimensionalidad, mayor o menor.

Las mismas leyes fundamentales de la física se aplicarían en todo el conjunto de branas, puesto que todas surgen de una única teoría, la teoría-M/de cuerdas. Pero igual que sucedía con los universos burbuja en el multiverso inflacionario, los detalles del entorno tales como el valor de este o aquel campo que impregna una brana, o incluso el número de dimensiones espaciales que definen una brana, pueden afectar profundamente a sus características físicas. Algunos mundobranas podrían ser muy parecidos al nuestro, llenos de galaxias, estrellas y planetas, mientras que otros podrían ser muy diferentes. En una o más de estas branas podría haber seres autoconscientes que, como nosotros, una vez pensaron que su rebanada —su extensión de espacio— era la totalidad del cosmos. En el escenario mundobrana de la teoría de cuerdas reconoceríamos ahora esto como una perspectiva pueblerina. En el escenario mundobrana nuestro universo es tan sólo uno de los muchos que pueblan el multiverso brana.

Cuando el multiverso brana fue sugerido por primera vez en la comunidad de la teoría de cuerdas, la respuesta inmediata se centró en una pregunta obvia. Si hay branas gigantes aquí al lado, universos paralelos enteros suspendidos muy cerca como rebanadas de pan bien acomodadas entre sus vecinas, ¿por qué no los vemos?



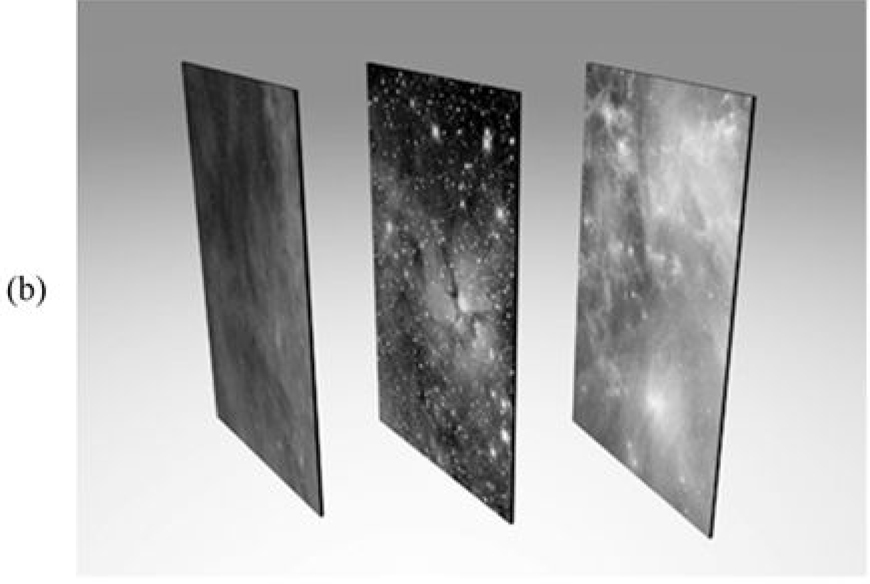


FIGURA 5.3. (a) En el escenario mundobrana se imagina que lo que tradicionalmente hemos pensado que es el cosmos entero reside en una brana tridimensional. Para facilitar la visualización, suprimimos una dimensión y mostramos el mundobrana como si tuviera dos dimensiones espaciales; también mostramos sólo un

fragmento finito de branas que pueden extenderse infinitamente lejos. (b) La extensión a mayores dimensiones de la teoría de cuerdas puede acomodar muchos mundobranas paralelos.

Branas pegajosas y tentáculos de gravedad

Las cuerdas se presentan en dos formas: lazos y segmentos. No he abordado esta distinción porque no es esencial para entender muchas de las características principales de la teoría. Pero para los mundobranas, la distinción entre lazos y segmentos es crucial, y una sencilla pregunta revela por qué. ¿Pueden las cuerdas despegarse de una brana? Respuesta: un lazo sí puede. Un segmento no puede.

Como el reputado teórico de cuerdas Joe Polchinski fue el primero en advertir, todo tiene que ver con los puntos extremos de un segmento de cuerda. Las ecuaciones que convencieron a los físicos de que las branas eran parte de la teoría de cuerdas también revelaban que las cuerdas y las branas tienen una relación particularmente íntima. Las branas son los únicos lugares donde pueden residir los puntos extremos de segmentos de cuerda, como en la Figura 5.4. Las matemáticas mostraron que si usted trata de eliminar de una membrana el punto extremo de una cuerda, está intentando lo imposible, como tratar de hacer π más pequeño o hacer la raíz cuadrada de 2 más grande. Desde el punto de vista físico es como tratar de eliminar el polo norte o el polo sur de los extremos de una barra magnética. Sencillamente es imposible. Los segmentos de cuerda pueden moverse libremente dentro y a través de una brana, deslizándose sin esfuerzo de un lugar a otro, pero no pueden dejarla.



FIGURA 5.4. Las branas son los únicos lugares donde pueden residir los puntos extremos de segmentos de cuerda.

Si estas ideas son más que sólo matemáticas interesantes y todos nosotros estamos de hecho viviendo en una brana, usted está ahora experimentando directamente el agarre atenazador que nuestra brana ejerce sobre los puntos extremos de la cuerda. Trate de saltar fuera de nuestra tres-brana. Inténtelo otra vez, más fuerte. Sospecho que todavía sigue aquí. En un mundobrana, las cuerdas que le constituyen a usted, y al resto de la materia ordinaria, son segmentos. Aunque usted puede saltar arriba y abajo, lanzar una bola de primera a segunda base y enviar una onda sonora desde la radio hasta el oído, todo ello sin que la brana ofrezca absolutamente ninguna resistencia, *usted no puede dejar la brana*. Cuando trata de despegarse, los puntos extremos de sus segmentos de cuerda le anclan a la brana, de forma inalterable. Nuestra realidad podría ser una lámina flotando en una extensión de más altas dimensiones, pero nosotros estaríamos permanentemente prisioneros, incapaces de aventurarnos fuera y explorar el cosmos más grande.

La misma imagen es válida para las partículas que transmiten las tres fuerzas no gravitatorias. El análisis muestra que tam-

bién ellas surgen de los segmentos de cuerda. Las más notables entre éstas son los fotones, los proveedores de la fuerza electromagnética. La luz visible, que es una corriente de fotones, puede entonces viajar libremente a través de la brana, desde este texto hasta sus ojos, o desde la galaxia Andrómeda hasta el Observatorio Wilson, pero también es incapaz de escapar. Otro mundobrana podría estar suspendido a milímetros de distancia, pero puesto que la luz no puede cruzar el hueco entre ambos, nunca veríamos el más mínimo indicio de su presencia.

La única fuerza que es diferente a este respecto es la gravedad. La característica que distingue a los gravitones, señalada en el capítulo 4, es que tienen espín 2, el doble del de las partículas que surgen de segmentos de cuerdas (tales como fotones) que transmiten las fuerzas no gravitatorias. Que los gravitones tienen un espín doble del de un segmento de cuerda individual significa que usted puede pensar que los gravitones están formados por dos de tales segmentos, de modo que los extremos de uno se unen a los del otro para dar un lazo. Y puesto que los lazos no tienen puntos extremos, las branas no pueden atraparlos. Por consiguiente, los gravitones pueden salir y volver a entrar en un mundobrana. Así pues, en un escenario mundobrana la gravedad proporciona nuestro único medio de sondear más allá de nuestra extensión espacial tridimensional.

Este hecho desempeña un papel central en algunos de los tests potenciales de la teoría de cuerdas mencionados en el capítulo 4 (Tabla 4.1). En los años ochenta y noventa, antes de que las branas entraran en la imagen, los físicos imaginaban que las dimensiones extra de la teoría de cuerdas eran más o menos del tamaño de Planck (un radio de unos 10^{-33} centímetros), la escala natural para una teoría que incluye a la gravedad y a la mecánica cuántica. Pero el escenario mundobrana anima a un pensamiento más expansivo. Con nuestra única sonda más allá de las tres dimensiones comunes que es la gravedad —la más

débil de todas las fuerzas—, las dimensiones extra pueden ser mucho más grandes y haber evitado todavía la detección. Hasta ahora.

Si existen las dimensiones extra, y son *mucho* más grandes de lo que se pensaba anteriormente —quizá mil billones de billones de veces más grandes (unos 10^{-4} centímetros)—, entonces experimentos que midan la intensidad de la gravedad, descritos en la segunda hilera de la Tabla 4.1, representan una oportunidad de detectarlas. Cuando los objetos se atraen mutuamente por la fuerza de la gravedad, intercambian corrientes de gravitones; los gravitones son mensajeros invisibles que comunican la influencia de la gravedad. Cuantos más gravitones intercambian los objetos, más fuerte es la atracción gravitatoria mutua. Cuando algunos de estos gravitones que fluyen dejan nuestra brana y entran en las dimensiones extra, la atracción gravitatoria entre objetos se diluirá. Cuanto mayores son las dimensiones extra, mayor es la dilución, y más débil parece la gravedad. Midiendo cuidadosamente la atracción gravitatoria entre dos objetos acercados a una distancia menor que el tamaño de las dimensiones extra, los experimentadores piensan interceptar los gravitones antes de que se escapen de nuestra brana; si es así, los experimentadores medirían una intensidad para la gravedad que es proporcionalmente mayor. Así, aunque no lo mencioné en el capítulo 4, esta aproximación para desenmascarar las dimensiones extra se basa en el escenario mundobrana.

Un aumento más modesto en el tamaño de las dimensiones extra, hasta sólo unos 10^{-18} centímetros, aún las haría potencialmente accesibles para el Gran Colisionador de Hadrones. Como se discutía en la tercera entrada de la Tabla 4.1, colisiones de alta energía entre protones pueden expulsar residuos a las dimensiones extra, lo que da como resultado una pérdida aparente de energía en nuestras dimensiones que podría ser detectable. También este experimento se basa en el escenario mun-

dobrana. Datos que atestigüen una pérdida de energía se explicarían postulando que nuestro universo existe en una brana y argumentando que los residuos con capacidad de escapar de nuestra brana —gravitones— se han llevado la energía.

La posibilidad de miniagujeros negros, la cuarta entrada de la Tabla 4.1, es otro subproducto más del mundobrana. El Gran Colisionador de Hadrones representa una oportunidad de producir miniagujeros negros en colisiones protón-protón sólo si la intensidad intrínseca de la gravedad se hace mayor cuando se sondea a distancias cortas. Como antes, es el escenario mundobrana el que lo hace posible.

Los detalles arrojan nueva luz sobre estos tres experimentos. No es sólo que estos experimentos busquen pruebas de estructuras exóticas tales como dimensiones extra del espacio y miniagujeros negros; también están buscando pruebas de que estamos viviendo en una brana. A su vez, un resultado positivo no sólo constituiría un buen argumento a favor del escenario mundobrana de la teoría de cuerdas, sino que también proporcionaría pruebas indirectas a favor de universos distintos del nuestro. Si podemos establecer que estamos viviendo en una brana, las matemáticas no nos dan ninguna razón para esperar que la nuestra sea la única.

Tiempo, ciclos y el multiverso

Los multiversos que hemos encontrado hasta ahora, por diferentes que sean en detalle, comparten un rasgo básico. En los multiversos mosaico, inflacionario y brana, todos los demás universos están «ahí fuera» en el espacio. Para el multiverso mosaico, «ahí fuera» significa muy lejos en el sentido cotidiano;

para el multiverso inflacionario significa más allá de nuestro universo burbuja y a lo largo del dominio interpuesto en rápida expansión; para el multiverso brana significa una distancia posiblemente corta, pero la separación es a través de otra dimensión. Pruebas en apoyo del escenario mundobrana nos llevarían a considerar seriamente otra variedad de multiverso, una variedad que saca partido no de las oportunidades que ofrece el espacio, sino de las del tiempo.[71]

Desde Einstein hemos sabido que espacio y tiempo pueden distorsionarse, curvarse y estirarse. Pero en general no concebimos que el universo entero flote de una manera o de otra. ¿Qué significaría que la totalidad del espacio se mueva diez metros «a la derecha» o a la «izquierda»? Es un buen rompecabezas, pero se hace trivial cuando se considera en el escenario mundobrana. Como las partículas y las cuerdas, las branas pueden moverse ciertamente a través del ambiente circundante en el que habitan. Y por ello, si el universo que observamos y experimentamos es una tres-brana, muy bien podríamos estar deslizándonos a través de una extensión espacial de dimensiones más altas.[72]

Si estamos en una tal brana deslizante, y hay otras branas próximas, ¿qué sucedería si chocamos con una de ellas? Aunque hay detalles que todavía no han sido plenamente elaborados, usted puede estar seguro de que una colisión entre dos branas —una colisión entre dos universos— sería violenta. La posibilidad más simple sería que dos tres-branas paralelas se acercaran cada vez más hasta que finalmente colisionaran frontalmente, algo parecido al choque de dos platillos. La tremenda energía concentrada en su movimiento relativo produciría una violenta ráfaga de partículas y radiación que borraría cualquier estructura organizada en uno u otro universo brana.

Para un grupo de investigadores, incluidos Paul Steinhardt, Neil Turok, Burt Ovrut y Justin Khoury, este cataclismo no só-

lo marca un final, sino también un principio. Un ambiente intensamente caliente y denso en el que las partículas fluyen de esta manera se parece mucho a las condiciones inmediatamente después del big bang. Quizá, entonces, cuando dos branas colisionan barren cualesquiera estructuras que puedan haberse formado durante una u otra de sus historias, desde galaxias hasta planetas o personas, al tiempo que establecen el escenario para un renacimiento cósmico. De hecho, una tres-brana llena con un plasma cegador de partículas y radiación responde precisamente como lo haría una extensión espacial tridimensional ordinaria: se expande. Y cuando lo hace, el entorno se enfría, lo que permite que las partículas se amontonen para producir finalmente la próxima generación de estrellas y galaxias. Algunos han sugerido que un nombre adecuado para este reprocesado de universos sería el *big splat* (o «gran ¡paf!»).

Por evocador que pueda ser, *splat* pasa por alto una característica central de las colisiones entre branas. Steinhardt y sus colaboradores han argumentado que cuando las branas colisionan, no se quedan adheridas, sino que rebotan. La fuerza gravitatoria que ejercen entre sí frena gradualmente su movimiento relativo; con el tiempo alcanzan una separación máxima a partir de la cual empiezan a aproximarse de nuevo. Cuando las branas vuelven a aproximarse, cada una de ellas se acelera y colisionan, y en la tormenta de fuego consiguiente se reinician las condiciones en cada brana, lo que pone en marcha una nueva era de evolución cosmológica. La esencia de esta cosmología implica así mundos que siguen ciclos repetidos a través del tiempo, generando una nueva variedad de universos paralelos llamada el *multiverso cíclico*.

Si estamos viviendo en una brana en el multiverso cíclico, los otros universos miembros (además de la brana asociada con la que colisionamos periódicamente) están en nuestros pasado y futuro. Steinhardt y sus colaboradores estimaron la escala de

tiempo para un ciclo completo del tango cósmico de colisión —nacimiento, evolución y muerte— y dieron con un valor de aproximadamente un billón de años. En este escenario, el universo tal como lo conocemos sería meramente el último en una serie temporal de universos, algunos de los cuales podrían haber contenido vida inteligente y la cultura que creó, pero ahora hace tiempo que están extinguidos. A su debido tiempo, todas nuestras contribuciones y las de cualesquiera otras formas de vida que soporta nuestro universo serían borradas del mismo modo.

El pasado y el futuro de los universos cíclicos

Aunque la aproximación mundobrana es su encarnación más refinada, las cosmologías cíclicas han gozado de una larga historia. La rotación de la Tierra, que da la predecible pauta de día y noche, así como su órbita, que da la secuencia repetitiva del paso de las estaciones, presagia las aproximaciones cíclicas elaboradas por muchas tradiciones en su intento de explicar el cosmos. Una de las más antiguas cosmologías precientíficas, la tradición hindú, concibe un complejo anidado de ciclos cosmológicos dentro de otros ciclos que, según algunas interpretaciones, se extienden desde millones hasta billones de años. Los pensadores occidentales, ya desde el filósofo presocrático Heráclito y el hombre de estado romano Cicerón, también desarrollaron varias teorías cosmológicas cíclicas. Un universo consumido por el fuego que renace de sus cenizas era un escenario popular entre quienes consideraban cuestiones elevadas tales como los orígenes cósmicos. Con la difusión de la cristiandad, el concepto de génesis como un suceso único llegó a imponer-

se, pero las teorías cíclicas continuaron atrayendo la atención de forma esporádica.

En la era científica moderna, los modelos cíclicos han sido estudiados desde las primeras investigaciones cosmológicas que invocaban la relatividad general. Alexander Friedmann, en un libro de divulgación publicado en Rusia en 1923, señaló que algunas de sus soluciones cosmológicas a las ecuaciones gravitatorias de Einstein sugerían un universo oscilante que se expandiría, alcanzaría un tamaño máximo, se contraería hasta un «punto», y luego podría empezar a expandirse de nuevo.[73] En 1931, el propio Einstein, que entonces había abandonado su propuesta de un universo estático, también investigó la posibilidad de un universo oscilatorio. Las investigaciones más detalladas fueron las presentadas en una serie de artículos publicados de 1931 a 1934 por Richard Tolman, del Instituto de Tecnología de California. Tolman emprendió investigaciones matemáticas completas de modelos cosmológicos cíclicos, lo que dio inicio a un flujo de estudios semejantes —a menudo arremolinados en los remansos de la física pero a veces con una mayor prominencia— que han continuado hasta hoy.

Parte del atractivo de una cosmología cíclica es su aparente capacidad para evitar la cuestión espinosa de cómo empezó el universo. Si el universo atraviesa un ciclo tras otro, y si los ciclos han sucedido siempre (y quizá siempre lo harán), entonces el problema de un comienzo último queda al margen. Cada ciclo tiene su propio inicio, pero la teoría proporciona una causa física concreta: la terminación del ciclo anterior. Y si usted pregunta por el comienzo del ciclo entero de universos, la respuesta es simplemente que no hubo tal principio, porque los ciclos han estado repitiéndose por toda la eternidad.

Así pues, los modelos cíclicos son, en cierto sentido, un intento de tener un pastel cosmológico y comérselo también. Ya en los primeros días de la cosmología científica, la teoría del *es-*

tado estacionario proporcionó su propia forma de evitar la cuestión del origen cósmico al sugerir que aunque el universo se está expandiendo, no tuvo un principio: conforme el universo se expande, se crea continuamente nueva materia para llenar el espacio adicional, lo que asegura que se mantienen condiciones constantes a lo largo del cosmos por toda la eternidad. Pero la teoría del estado estacionario entró en conflicto con las observaciones astronómicas que apuntaban con fuerza que en épocas anteriores las condiciones diferían notablemente de las que hoy experimentamos. Las más destacadas eran las observaciones que apuntaban a una fase cosmológica anterior que en absoluto era estacionaria y regular, sino más bien caótica y combustible. Un big bang echa por tierra los sueños de un estado estacionario y restituye la cuestión del origen al centro de la escena. Es aquí donde las cosmologías cíclicas ofrecen una alternativa atractiva. Cada ciclo *puede* incorporar un pasado tipo big bang, en acuerdo con los datos astronómicos. Pero encadenando un número infinito de ciclos, la teoría aún evita tener que proporcionar un primer principio. Podría parecer que las cosmologías cíclicas combinaban los aspectos más atractivos de los modelos del estado estacionario y del big bang.

Luego, en 1950, el astrofísico holandés Herman Zanstra llamó la atención sobre una característica problemática de los modelos cíclicos, una característica que estaba implícita en el análisis de Tolman, un par de décadas antes. Zanstra demostró que no podía haber habido un número infinito de ciclos previos al nuestro. Un factor importante en los trabajos cosmológicos fue la segunda ley de la termodinámica. Esta ley, que discutiremos con más detalle en el capítulo 9, establece que el desorden —*entropía*— aumenta con el tiempo. Es algo que experimentamos rutinariamente. Las cocinas, por muy ordenadas que estén por la mañana, tienden a estar desordenadas a la caída de la noche; lo mismo sucede con los cestos para la ropa sucia, las

mesas de trabajo y las habitaciones de juegos. En estas situaciones cotidianas, el aumento de la entropía es una simple molestia; en cosmología cíclica, el aumento de la entropía es fundamental. Como el propio Tolman había comprendido, las ecuaciones de la relatividad general vinculan el contenido del universo con la duración de un ciclo dado. Más entropía significa más partículas desordenadas que son comprimidas cuando el universo se contrae; eso genera un rebote más potente, el espacio se expande más y por ello el ciclo dura más tiempo. Mirando retrospectivamente, la segunda ley implica que ciclos cada vez más tempranos habrían tenido cada vez menos entropía (porque la segunda ley dice que la entropía aumenta hacia el futuro, debe disminuir hacia el pasado),[74] y así habrían tenido duraciones cada vez más cortas. Desarrollando esto matemáticamente, Zanstra demostró que yendo suficientemente atrás en el tiempo, los ciclos habrían sido tan cortos que habrían cesado. *Habrían* tenido un comienzo.

Steihardt y compañía afirman que su nueva versión de la cosmología cíclica evita esta trampa. En su aproximación, los ciclos no son el resultado de un universo que se expande, se contrae y se expande de nuevo, sino más bien de la *separación* entre mundobranas que se expanden, se contraen y se expanden de nuevo. Las propias branas se expanden continuamente, y lo hacen a lo largo de todos y cada uno de los ciclos. La entropía se acumula de un ciclo al siguiente, precisamente como requiere la segunda ley, pero puesto que las branas se expanden, la entropía se reparte sobre volúmenes espaciales cada vez mayores. La entropía total crece, pero la densidad de entropía decrece. Al final de cada ciclo la entropía está tan diluida que su densidad se ha hecho muy próxima a cero: un reinicio completo. Y así, a diferencia de lo que sucede en el análisis de Tolman y Zanstra, los ciclos pueden continuar indefinidamente hacia el

futuro tanto como hacia el pasado. El multiverso cíclico mundobrana no necesita un comienzo en el tiempo.[75]

Esquivar un viejo enigma es un punto en el haber del multiverso cíclico. Pero como señalan sus proponentes, el multiverso cíclico va más allá de dar una solución a enigmas cosmológicos: hace una predicción concreta que le distingue del paradigma inflacionario ampliamente aceptado. En la cosmología inflacionaria, el violento brote de expansión en el universo primitivo habría perturbado tanto el tejido espacial que se habrían producido ondas gravitatorias sustanciales. Estos rizos habrían dejado huellas en la radiación cósmica de fondo de microondas, y observaciones altamente sensibles las están buscando ahora. Una colisión de branas, por el contrario, crea una vorágine momentánea —pero sin el espectacular estiramiento inflacionario del espacio, cualquier onda gravitatoria producida sería casi con seguridad demasiado débil para crear una señal duradera—. Por ello, la evidencia de ondas gravitatorias producidas en el universo primitivo sería evidencia fuerte en contra del multiverso cíclico. Por el contrario, un fracaso en observar estas ondas gravitatorias pondría en serias dificultades a muchos modelos inflacionarios y haría mucho más atractivo el marco cíclico.

El multiverso cíclico es ampliamente conocido dentro de la comunidad de la física pero, casi tan ampliamente, es visto con mucho escepticismo. Las observaciones tienen la potencialidad de cambiar esto. Si surgen pruebas a favor de mundobranas del Gran Colisionador de Hadrones, y las señales de ondas gravitatorias procedentes del universo primitivo siguen siendo evasivas, el multiverso cíclico ganará probablemente un mayor apoyo.

El hecho matemático de que la teoría de cuerdas es no sólo una teoría de cuerdas, sino que también incluye branas, ha tenido un efecto importante en la investigación en el campo. El escenario mundobrana, y los multiversos a que da lugar, es un área de investigación con la capacidad de rehacer profundamente nuestra perspectiva sobre la realidad. Sin los métodos matemáticos más exactos desarrollados durante los últimos quince años, la mayoría de estas ideas habría quedado fuera del alcance. Sin embargo, el problema principal que los físicos esperaban que podrían abordar los métodos más exactos —la necesidad de seleccionar una forma para las dimensiones extra de entre las muchas candidatas que han revelado los análisis teóricos— todavía no ha sido resuelto. Estamos lejos de ello. De hecho, los nuevos métodos han hecho el problema más desafiante. Han dado como resultado el descubrimiento de muchísimas nuevas clases de formas posibles para las dimensiones extra, lo que incrementa enormemente el conjunto de candidatos, aunque no proporciona la más mínima intuición acerca de cómo discriminar una como la nuestra.

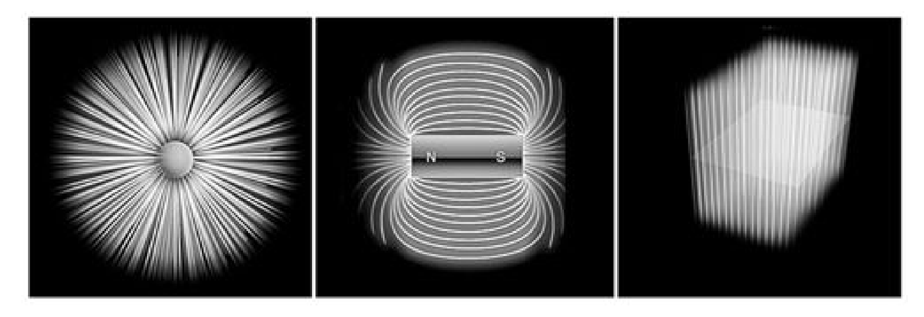


FIGURA 5.5. Flujo eléctrico producido por un electrón; flujo magnético producido por una barra magnética; flujo de brana producido por una brana.

Fundamental para estos desarrollos es una propiedad de las branas llamada *flujo*. Así como un electrón da lugar a un campo eléctrico, una «niebla» eléctrica que permea su región, también una brana da lugar a un *campo brana*, una «niebla» brana que permea su región, como en la Figura 5.5. Cuando Faraday estaba realizando los primeros experimentos con campos eléctricos y magnéticos, en la primera mitad del siglo XIX, imaginó una forma de cuantificar su intensidad delineando la densidad de líneas de campo a una distancia dada de la fuente, una medida que él llamó el *flujo* del campo. Desde entonces, la palabra se ha asentado en el léxico de la física. La intensidad del campo de una brana también está delineada por el flujo que genera.

Teóricos de cuerdas, incluidos Raphael Bousso, Polchinski, Steven Giddings, Shamit Kachru y muchos otros, se dieron cuenta de que una descripción completa de las dimensiones extra de la teoría de cuerdas requiere especificar no sólo su forma y tamaño —en lo que los investigadores en esta área, yo incluido, se habían centrado más o menos exclusivamente en los años ochenta y primeros años noventa—, sino *también* especificar los flujos de brana que las permean. Permítame un momento para desarrollar esto.

Desde el primer trabajo matemático que investigaba las dimensiones extra de la teoría de cuerdas, los investigadores han sabido que las formas de Calabi-Yau contienen normalmente muchas regiones abiertas, como el espacio en el interior de un balón playero, el agujero de un *donut*, o el espacio dentro de una escultura de vidrio soplado. Pero sólo en los primeros años del nuevo milenio los teóricos se dieron cuenta de que estas regiones abiertas no tienen por qué estar completamente vacías. Pueden estar cubiertas por una u otra brana, y atravesadas por flujos, como en la Figura 5.6. La investigación anterior (como se resume, por ejemplo, en *El universo elegante*) había considerado en su mayor parte solamente formas de Calabi-Yau «desnu-

das», carentes de tales adornos. Cuando los investigadores comprendieron que una forma de Calabi-Yau dada podía ser «vestida» con estas características adicionales, descubrieron una colección gigantesca de formas modificadas para las dimensiones extra.

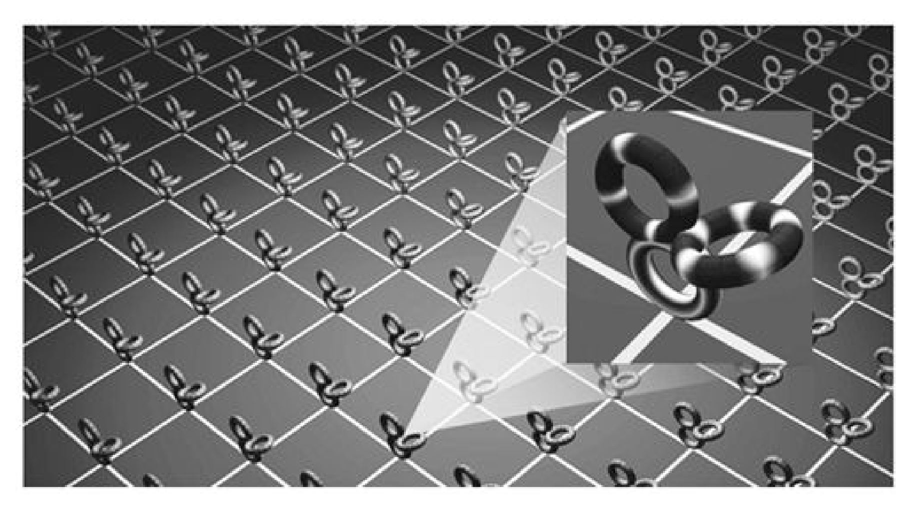


FIGURA 5.6. Partes de las dimensiones extra en la teoría de cuerdas pueden estar envueltas en branas y atravesadas por flujos, lo que da formas de Calabi-Yau «vestidas». (La figura utiliza una versión simplificada de una forma de Calabi-Yau —«un donut con tres agujeros»— y representa esquemáticamente branas enrolladas y líneas de flujo con bandas brillantes que rodean porciones de espacio).

Un recuento aproximado da una idea de la escala. Centrémonos en los flujos. Así como la mecánica cuántica establece que fotones y electrones vienen en unidades discretas —usted puede tener tres fotones y siete electrones, pero no 1,2 fotones y 6,4 electrones—, la mecánica cuántica muestra que las líneas de flujo también vienen en haces discretos. Pueden atravesar una superficie circundante una vez, dos veces, tres veces, y así sucesivamente. Pero salvo esta restricción a números enteros, no hay en principio ningún otro límite. En la práctica, cuando la cantidad de flujo es grande, tiende a distorsionar la forma de

Calabi-Yau circundante, lo que hace inexactos los métodos matemáticos que antes eran fiables. Para evitar aventurarse en estas aguas matemáticas más turbulentas, los investigadores consideran normalmente solo unos diez flujos, o incluso menos.[76]

Esto significa que si una forma de Calabi-Yau dada contiene una región abierta, podemos vestirla con flujo de diez maneras diferentes, lo que da diez nuevas formas para las dimensiones extra. Si una forma de Calabi-Yau dada tiene dos de estas regiones, hay $10 \times 10 = 100$ vestimentas de flujo diferentes (10 flujos posibles a través de la primera región, cada uno de los cuales se puede emparejar con 10 flujos a través de la segunda); con tres regiones abiertas hay 10^3 vestimentas de flujo diferentes, y así sucesivamente. ¿Qué tamaño puede tener el número de estas vestimentas? Algunas formas de Calabi-Yau tienen del orden de quinientas regiones abiertas. *El mismo razonamiento da del orden de* 10^{500} *formas diferentes para las dimensiones extra.*

De este modo, más que filtrar los candidatos para reducirlos a unas pocas formas específicas para las dimensiones extra, los métodos matemáticos más refinados han llevado a una plétora de nuevas posibilidades. De repente, los espacios de Calabi-Yau pueden vestirse con más conjuntos que partículas hay en el universo observable. Para algunos teóricos de cuerdas, esto supuso un gran disgusto. Como se resaltó en el capítulo anterior, sin un medio de elegir la forma exacta para las dimensiones extra —que ahora comprendemos que significa también seleccionar el conjunto de flujos que viste la forma—, las matemáticas de la teoría de cuerdas pierden su poder predictivo. Se habían puesto muchas esperanzas en métodos matemáticos que podían ir más allá de las limitaciones de la teoría de perturbaciones. Pero cuando algunos de tales métodos se materializaron, el problema de fijar la forma para las dimensiones extra empeoró. Algunos teóricos de cuerdas se descorazonaron.

Otros, más optimistas, creen que es demasiado pronto para perder la esperanza. Algún día —quizá un día que está a la vuelta de la esquina, quizá un día que está muy lejos— descubriremos el principio ausente que determina cómo serían las dimensiones extra, incluidos los flujos con que la forma puede estar relacionada.

Y otros han tomado una vía más radical. Quizá, sugieren, las décadas de intentos infructuosos por restringir la forma para estas dimensiones extra nos están diciendo algo. Quizá, siguen diciendo estos radicales temerarios, tenemos que tomar en serio todas las formas y los flujos posibles que salen de las matemáticas de la teoría de cuerdas. Quizá, insisten, la razón de que las matemáticas contengan todas estas posibilidades es que *todas son reales*, siendo cada forma la parte extradimensional de su propio universo separado. Y tal vez, basando en los datos observacionales un vuelo de fantasía aparentemente incontrolado, esto es simplemente lo que se necesita para abordar quizá el problema más espinoso de todos: la constante cosmológica.

6

Nuevas ideas sobre una vieja constante

El multiverso paisaje

Podría parecer que la diferencia entre 0 y 0,00000000000000000000 0000000000000000000 00000000000000000000 00000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000001 no es muy grande. Y no lo es para cualquier medida familiar. Pese a todo, hay una creciente sospecha de que esta minúscula diferencia puede ser responsable de un cambio radical en nuestra concepción del paisaje de la realidad.

El minúsculo número arriba impreso fue medido por primera vez en 1998 por dos equipos de astrónomos que hacían meticulosas observaciones de estrellas que explotaban en galaxias distantes. Desde entonces, el trabajo de muchos otros ha corroborado el resultado del equipo. ¿Qué es este número y por qué tanto revuelo? Hay evidencia creciente de que es aquello a lo que me he referido antes como la entrada en la tercera línea de la declaración de renta de la relatividad general: la constante cosmológica de Einstein, que especifica la cantidad de energía oscura invisible que permea el tejido del espacio.

Mientras el resultado sigue sometido a un intenso escrutinio, los físicos están cada vez más convencidos de que décadas de observaciones y deducciones teóricas anteriores, que habían llevado a pensar a la inmensa mayoría de los investigadores que la

constante cosmológica era 0, han sido derrocadas. Los teóricos se apresuraron a descubrir en qué se habían equivocado. Pero no todos lo habían hecho. Años antes, una controvertida línea de pensamiento había sugerido que quizá algún día podría encontrarse una constante cosmológica no nula. ¿La hipótesis clave? Estamos viviendo en uno de muchos universos. *Muchos* universos.

El retorno de la constante cosmológica

Recordemos que la constante cosmológica, si existe, llena el espacio con una energía uniforme invisible —energía oscura— cuya característica icónica sería su fuerza gravitatoria repulsiva. Einstein asumió la idea en 1917, al invocar la antigravedad de la constante cosmológica para compensar el tirón gravitatorio atractivo de la materia ordinaria del universo, y permitir así un cosmos que no se expandía ni se contraía.[77]

Muchos han referido que al saber de las observaciones de Hubble en 1929, que establecían que el espacio se está expandiendo, Einstein calificó a la constante cosmológica como su «mayor patinazo». George Gamow relataba una conversación en la que se supone que Einstein había dicho esto pero, dado el gusto de Gamow por las exageraciones jocosas, algunos han cuestionado la exactitud de la historia.[78] Lo que es seguro es que Einstein sacó la constante cosmológica de sus ecuaciones cuando las observaciones mostraron que su creencia en un universo estático estaba equivocada, y años más tarde señaló que «si la expansión de Hubble se hubiera descubierto en la época de la creación de la teoría de la relatividad general, nunca se habría introducido la constante cosmológica».[79] Pero la visión re-

trospectiva no siempre es aguda; a veces puede enturbiar la claridad previa. En 1917, en una carta dirigida al físico Willem de Sitter, Einstein expresaba un punto de vista más matizado:

> *En cualquier caso, una cosa es clara. La teoría de la relatividad general admite la inclusión de la constante cosmológica en las ecuaciones del campo. Probablemente algún día nuestro conocimiento real de la composición del cielo de las estrellas fijas, los movimientos aparentes de las estrellas fijas y la posición de las líneas espectrales en función de la distancia, habrá llegado suficientemente lejos para que seamos capaces de decidir empíricamente la cuestión de si se anula o no la constante cosmológica. La convicción es un buen motivo, pero un mal juez.*[80]

Unos ochenta años más tarde, el Proyecto Cosmología de Supernovas, dirigido por Saul Perlmutter, y el Equipo de Búsqueda de Supernovas de Alto Z, dirigido por Brian Schmidt, adoptó este mismo enfoque. Estudiaron meticulosamente una abundancia de *líneas espectrales* —luz emitida por estrellas distantes— y, precisamente como Einstein había anticipado, fueron capaces de abordar empíricamente la cuestión de si se anula la constante cosmológica.

Para conmoción de muchos, encontraron sólida evidencia de que no lo hace.

Destino cósmico

Cuando estos astrónomos empezaron su trabajo, ninguno de los dos grupos estaba centrado en medir la constante cosmológica. Más bien, los equipos habían previsto medir otra característica cosmológica, el ritmo al que se está frenando la expansión del espacio. La gravedad atractiva ordinaria actúa para

acercar todos los objetos, lo que hace que disminuya la velocidad de expansión. El ritmo de frenado exacto es fundamental para predecir cómo será el universo en un futuro lejano. Un gran frenado significaría que la expansión del espacio disminuiría hasta hacerse cero y luego invertiría su movimiento, lo que llevaría a un período de contracción espacial. Si esta contracción continúa sin perder intensidad, podría dar como resultado un *big crunch* —el inverso de un big bang— o quizá un rebote, como en los modelos cíclicos presentados en el capítulo anterior. Un frenado pequeño tendría un efecto muy diferente. Del mismo modo que una bola lanzada a gran velocidad puede escapar de la gravedad de la Tierra y alejarse cada vez más, también el espacio podría expandirse indefinidamente si la velocidad de la expansión fuera suficientemente alta y el ritmo de frenado suficientemente débil. Midiendo el frenado cósmico, los dos grupos buscaban el destino final del cosmos.

La aproximación de cada equipo era simple: medir con qué rapidez se estaba expandiendo el espacio en diferentes momentos en el pasado y, comparando dichas velocidades, determinar el ritmo al que se ha estado frenando la expansión en el curso de la historia cósmica. Muy bien. Pero ¿cómo haría usted esto? Como sucede con muchas preguntas en astronomía, la respuesta se reduce a hacer medidas minuciosas de la luz. Las galaxias son balizas luminosas cuyo movimiento marca la expansión del espacio. Si pudiéramos determinar con qué rapidez se estaban alejando de nosotros las galaxias en un rango de distancias cuando emitieron la luz que vemos ahora, podríamos determinar con qué rapidez se estaba expandiendo el espacio en varios momentos en el pasado. Comparando dichas velocidades, sabríamos el ritmo de frenado cósmico. Ésa es la idea esencial.

Para completar los detalles tenemos que abordar dos cuestiones primordiales. Partiendo de las observaciones actuales de galaxias lejanas, ¿cómo podemos determinar sus distancias, y

cómo podemos determinar sus velocidades? Empecemos por la distancia.

Distancia y brillo

Uno de los problemas más viejos y más importantes en astronomía es determinar las distancias a los objetos celestes. Y una de las primeras técnicas para hacerlo, la *paralaje*, es una aproximación con la que experimentan rutinariamente los niños de cinco años. Los niños pueden quedar fascinados (momentáneamente) mirando un objeto mientras cierran alternativamente el ojo izquierdo y el ojo derecho, porque el objeto parece saltar de un lado a otro. Si hace tiempo que usted tuvo cinco años, ensaye el experimento sujetando este libro y mirando una de sus esquinas. El salto ocurre porque sus ojos izquierdo y derecho, al estar separados, tienen que apuntar a ángulos diferentes para concentrarse en el mismo punto. Para objetos que están más lejos, el salto es menos apreciable, porque la diferencia en el ángulo se hace más pequeña. Esta simple observación puede hacerse cuantitativa, lo que proporciona una correlación precisa entre el ángulo que forman las líneas visuales de sus dos ojos —la paralaje— y la distancia al objeto que usted está viendo. Pero no tiene que preocuparse por los detalles; su sistema visual lo hace automáticamente. Por esto es por lo que usted ve el mundo en 3D.[81]

Cuando usted mira estrellas en el cielo nocturno, la paralaje es demasiado pequeña para ser medida con fiabilidad; sus ojos están demasiado juntos para dar una diferencia en ángulos significativa. Pero hay una manera más ingeniosa: medir la posición de una estrella en dos ocasiones, con un intervalo de seis

meses, y utilizar las dos localizaciones de la Tierra en lugar de las dos localizaciones de sus ojos. La mayor separación de las localizaciones de observación aumenta la paralaje, que sigue siendo pequeña pero en algunos casos es suficientemente grande como para ser medida. Ya a principios del siglo XIX hubo una fuerte competición entre un grupo de científicos por ser el primero en medir dicha paralaje estelar; en 1838, el astrónomo y matemático alemán Friedrich Bessel se hizo con el título al medir con éxito la paralaje de una estrella llamada 61 Cygni, en la constelación del Cisne. La diferencia angular resultó ser de 0,000084 grados, lo que sitúa la estrella a unos diez años luz.

Desde entonces la técnica se ha refinado continuamente, y ahora se utiliza con satélites que pueden medir ángulos de paralaje mucho menores que los que pudo medir Bessel. Tales avances han permitido medidas aproximadas de las distancias a estrellas que están a algunos miles de años luz, pero mucho más allá de eso las diferencias angulares vuelven a hacerse demasiado pequeñas y el método no es aplicable.

Otra aproximación, que permite medir distancias celestes aún más grandes, se basa en una idea todavía más simple: cuanto más lejos de usted se mueve un objeto que emite luz, ya sean los faros de un automóvil o una estrella brillante, más se dispersará la luz emitida durante su viaje hasta usted, y por ello aparecerá más débil. Comparando el brillo aparente de un objeto (cuán brillante parece visto desde la Tierra) con su brillo intrínseco (cuán brillante aparecería si fuera observado desde cerca), se puede determinar su distancia.

La pega, y no pequeña, está en establecer el brillo intrínseco de objetos astrofísicos. ¿Es oscura una estrella porque está especialmente distante, o lo es simplemente porque no emite mucha luz? Esto aclara por qué se ha dedicado tanto esfuerzo durante mucho tiempo a encontrar especies astronómicas relativamente comunes cuyos brillos intrínsecos puedan determinarse

de manera fiable sin necesidad de estar muy próximos a ellas. Si usted pudiera encontrar estas denominadas *candelas estándar*, tendría un banco de pruebas uniforme para estimar distancias. El grado en que una candela estándar aparece más oscura que otra le diría directamente cuánto más alejada está.

Durante más de un siglo se han propuesto y utilizado diversas candelas estándar, con éxito diverso. En tiempos recientes, el método más fructífero ha hecho uso de un tipo de explosión estelar llamado Supernova Tipo Ia. Una Supernova Tipo Ia ocurre cuando una estrella enana blanca atrae material de la superficie de una compañera, normalmente una gigante roja vecina que orbita a su alrededor. La física bien establecida de la estructura estelar afirma que si la enana blanca atrae material suficiente (de modo que su masa total aumenta hasta casi 1,4 veces la masa del Sol), ya no puede aguantar su propio peso. La estrella enana engordada colapsa, lo que desencadena una explosión tan violenta que la luz generada rivaliza con la producción combinada de las otras cien mil millones de estrellas, aproximadamente, que residen en su misma galaxia.

Estas supernovas son candelas estándar ideales. Puesto que las explosiones son tan potentes, podemos verlas a distancias fantásticamente grandes. Y, lo que es crucial, puesto que todas las explosiones son resultado del mismo proceso físico —una masa de enana blanca que aumenta hasta ser 1,4 veces la del Sol, y da como resultado un colapso estelar—, las supernovas consiguientes alcanzan picos de brillo intrínseco muy similares. El problema de utilizar supernovas Tipo Ia, no obstante, está en que en una galaxia típica ocurren sólo una vez cada pocos cientos de años: ¿cómo captarlas en el momento exacto? Tanto el Proyecto Cosmología de Supernovas como el Equipo de Búsqueda de Supernovas de Alto Z removieron este obstáculo de una manera que recuerda a los estudios epidemiológicos: puede obtenerse información precisa incluso sobre situaciones

relativamente raras si se estudian grandes poblaciones. Del mismo modo, utilizando telescopios equipados con detectores de amplio campo de visión, capaces de examinar simultáneamente miles de galaxias, los investigadores pudieron localizar docenas de supernovas Tipo Ia, que luego pudieron ser observadas con más detalle con telescopios más convencionales. Basándose en el brillo que presentaba cada una de ellas, los equipos fueron capaces de calcular las distancias a docenas de galaxias situadas a miles de millones de años luz, consiguiendo así dar el primer paso en la tarea que se habían propuesto.

¿Cuál es la distancia, en cualquier caso?

Antes de ir al paso siguiente, la determinación de la velocidad a la que estaba expandiéndose el universo cuando ocurrió cada una de estas supernovas distantes, permítame deshacer un posible nudo de confusión. Cuando estamos hablando de distancias en escalas tan fantásticamente grandes, y en el contexto de un universo que se está expandiendo de continuo, surge de modo inevitable la pregunta de qué distancia están midiendo los astrónomos realmente. ¿Es la distancia entre los lugares que ocupábamos nosotros y una galaxia dada hace eones, cuando la galaxia emitió la luz que ahora estamos viendo? ¿Es la distancia entre nuestra posición actual y la posición que ocupaba la galaxia hace eones, cuando la galaxia emitió la luz que ahora estamos viendo? ¿O es la distancia entre nuestra posición actual y la posición actual de la galaxia?

Voy a exponer la que yo considero la manera más intuitiva de pensar sobre estas y muchas otras igualmente confusas cuestiones cosmológicas.

Imagine que usted quiere conocer las distancias, en línea recta, entre tres ciudades, Nueva York, Los Ángeles y Austin, de modo que mide su separación en un mapa de Estados Unidos. Usted encuentra que Nueva York está a 39 centímetros de Los Ángeles; Los Ángeles está a 19 centímetros de Austin; y Austin está a 24 centímetros de Nueva York. Luego convierte estas medidas en distancias en el mundo real mirando la leyenda del mapa que proporciona un factor de conversión —1 centímetro = 100 kilómetros—, lo que le permite concluir que las tres ciudades están a unos 3.900 kilómetros, 1.900 kilómetros y 2.400 kilómetros, respectivamente.

Imagine ahora que la superficie de la Tierra se hincha de manera uniforme y todas las separaciones se duplican. Esto sería desde luego una transformación radical, pero incluso así su mapa de Estados Unidos seguiría siendo perfectamente válido con tal de que usted hiciera un cambio importante. Tendría que modificar la leyenda de modo que el factor de conversión diga «1 centímetro = 200 kilómetros». Treinta y nueve centímetros, 19 centímetros y 24 centímetros en el mapa corresponderían ahora a 7.800 kilómetros, 3.800 kilómetros y 4.800 kilómetros a través de Estados Unidos expandido. Si continuara la expansión de la Tierra, su mapa estático e invariable seguiría siendo preciso, con tal de que usted actualizara continuamente su leyenda con el factor de conversión relevante en cada momento —1 centímetro = 200 kilómetros al mediodía; 1 centímetro = 300 kilómetros a las dos de la tarde; 1 centímetro = 400 kilómetros a las cuatro de la tarde— para reflejar cómo están siendo separadas las localizaciones por la expansión de la superficie.

La Tierra en expansión es una metáfora útil, porque consideraciones similares son aplicables al cosmos en expansión. Las galaxias no se mueven por su propio impulso. Más bien, como las ciudades en nuestra Tierra en expansión, se separan, porque

el sustrato en el que están inmersas —el propio espacio— se está hinchando. Esto significa que si un cartógrafo cósmico hubiera cartografiado las posiciones de las galaxias hace miles de millones de años, el mapa sería tan válido hoy como lo era entonces.[82] Pero, como la leyenda en el mapa de la Tierra en expansión, la leyenda del mapa cósmico debe ser actualizada para asegurar que el factor de conversión de distancias en el mapa en distancias reales siga siendo exacto. El factor de conversión cosmológico se denomina *factor de escala* del universo; en un universo en expansión, el factor de escala aumenta con el tiempo.

Cuando quiera que usted piense en el universo en expansión, le animo a que imagine un mapa cósmico invariable. Piense en ello como si fuera un mapa ordinario extendido sobre una mesa, y tenga en cuenta la expansión cósmica actualizando en el tiempo la leyenda del mapa. Con un poco de práctica verá que esta aproximación simplifica enormemente los obstáculos conceptuales.

A modo de ejemplo, consideremos la luz procedente de una explosión de supernova en una galaxia distante. Cuando comparamos el brillo aparente de la supernova con su brillo intrínseco, estamos midiendo la reducción de la intensidad de la luz entre emisión (Figura 6.1a) y recepción (Figura 6.1c), debida a que se ha repartido sobre una gran esfera (dibujada como un círculo en la Figura 6.1d) durante el viaje. Midiendo la reducción, determinamos el tamaño de la esfera —el área de su superficie— y luego, con un poco de geometría que se estudia en el instituto, podemos determinar el radio de la esfera. Este radio marca la trayectoria entera de la luz, y así su longitud es igual a la distancia que ha recorrido la luz. Ahora viene la pregunta con que se ha iniciado esta sección: ¿a cuál de las tres distancias candidatas corresponde la medida?

Durante el viaje de la luz, el espacio se ha expandido continuamente. Pero el único cambio que esto requiere para el mapa

cósmico estático es una actualización regular del factor de escala registrado en la leyenda. Y puesto que precisamente *ahora* acabamos de recibir la luz de la supernova, puesto que precisamente *ahora* acaba de completar su viaje, debemos utilizar el factor de escala que precisamente *ahora* está escrito en la leyenda del mapa para traducir la separación en el mapa —la trayectoria desde la supernova hasta nosotros, trazada en la Figura 6.1d— en la distancia física recorrida. El procedimiento deja claro que el resultado es la distancia *ahora* entre nosotros y la posición actual de la galaxia: la tercera de nuestras opciones de elección múltiple.

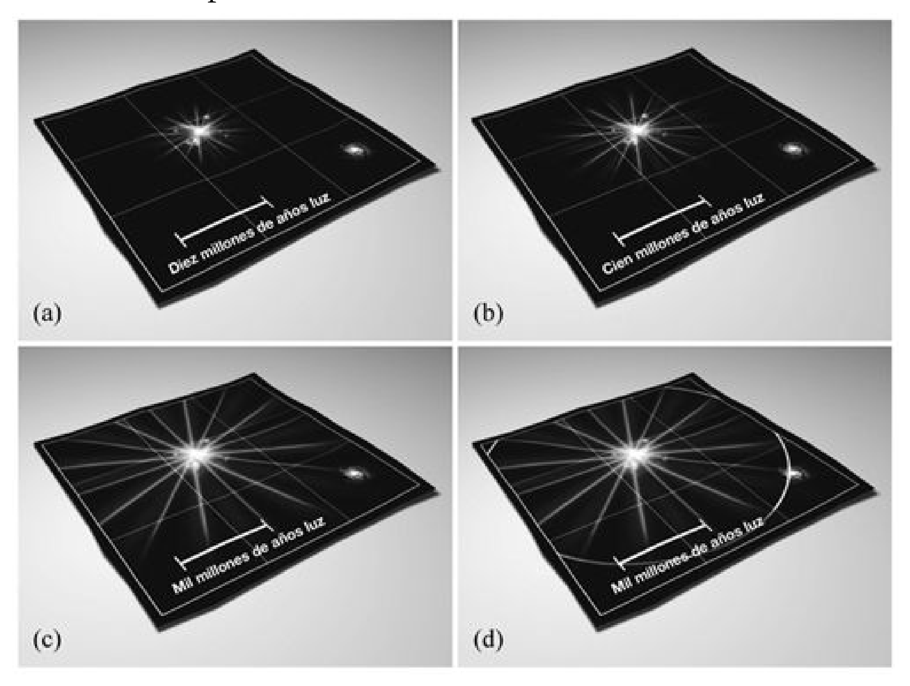


FIGURA 6.1. La luz procedente de una supernova distante se dispersa cuando viaja hacia nosotros (estamos situados en la galaxia en el lado derecho del mapa). (b) Durante el viaje de la luz, el universo se expande, lo que se refleja en la leyenda del mapa. (c) Cuando recibimos la luz, su intensidad se ha diluido debido a la dispersión. (d) Cuando comparamos el brillo aparente de la su-

pernova con su brillo intrínseco, estamos midiendo el área de la esfera sobre la que se ha dispersado (dibujada como un círculo), y con ello también su radio. El radio de la esfera marca la trayectoria de la luz. Su longitud es la distancia ahora entre nosotros y la galaxia que contenía a la supernova, de modo que es la que determinan las observaciones.

Nótese, también, que puesto que el universo se está expandiendo continuamente, los segmentos anteriores de la trayectoria de un fotón siguen estirándose después de que el fotón ha pasado. Si un fotón dejara una línea en el espacio que marcara su trayectoria, la longitud de dicha línea aumentaría conforme el espacio se expandiera. Aplicando el factor de escala del mapa en el momento de la recepción al viaje completo de la luz, la tercera respuesta incorpora directamente toda la expansión. Ésta es la aproximación correcta, porque la cantidad en que se reduce la intensidad de la luz depende del tamaño de la esfera sobre la que la luz se reparte *ahora* —y el radio de esta esfera es la longitud de la trayectoria de la luz *ahora*, incluido todo el estiramiento posfacto—.[83]

Por consiguiente, cuando comparamos el brillo intrínseco de una supernova con su brillo aparente, estamos determinando la distancia ahora entre nosotros y la galaxia en que la supernova se encontraba. Éstas son las distancias que midieron los dos grupos de astrónomos.[84]

Los colores de la cosmología

Hasta aquí lo relativo a medir distancias a galaxias lejanas que contienen brillantes supernovas Tipo Ia. ¿Cómo obtendríamos el ritmo de expansión del universo hace mucho tiempo,

cuando se encendieron momentáneamente estos faros cósmicos? La física implicada no es mucho más compleja que la que explica los anuncios de neón.

Un anuncio luminoso de neón brilla en color rojo porque cuando una corriente eléctrica atraviesa el interior gaseoso del tubo, los electrones que están en órbita en los átomos de neón son elevados momentáneamente a estados de mayor energía. Luego, cuando los átomos de neón se desexcitan, los átomos excitados caen a su estado de movimiento habitual y se libera la energía extra mediante emisión de fotones. El color de los fotones —su longitud de onda— está determinado por la energía que llevan. Un descubrimiento clave, plenamente establecido por la mecánica cuántica en las primeras décadas del siglo XX, es que los electrones de los átomos de un elemento dado sólo pueden saltar a unos estados de energía característicos del elemento; esto se traduce en una única colección de colores para los fotones liberados. Para los átomos de neón, un color dominante es el rojo (o, mejor dicho, rojo anaranjado), lo que explica la apariencia de los tubos de neón. Otros elementos —helio, oxígeno, cloro y demás— muestran un comportamiento similar, siendo la diferencia principal las longitudes de onda de los fotones emitidos. Un anuncio de «neón» de un color distinto del rojo estará lleno muy probablemente de mercurio (si es azul) o de helio (si es dorado), o está hecho de tubos de vidrio recubiertos de sustancias, típicamente fósforos, cuyos átomos pueden emitir luz de otras longitudes de onda.

Buena parte de la astronomía observacional se basa en las mismas consideraciones. Los astrónomos utilizan telescopios para recoger luz de objetos distantes, y a partir de los colores que encuentran —las longitudes de onda concretas de la luz que miden— pueden identificar la composición química de las fuentes. Una primera demostración tuvo lugar durante el eclipse solar de 1868, cuando el astrónomo francés Pierre Janssen e,

independientemente, el astrónomo inglés Joseph Norman Lockyer examinaron la luz procedente de la capa más externa del Sol, apenas por debajo del borde solar, y encontraron una misteriosa emisión brillante con una longitud de onda que nadie podía reproducir en el laboratorio utilizando sustancias conocidas. Esto llevó a la sugerencia fundamental, y correcta, de que la luz era emitida por un nuevo elemento hasta entonces desconocido. La sustancia desconocida era el helio, que así reclama la singular distinción de ser el único elemento descubierto en el Sol antes de que se encontrara en la Tierra. Este trabajo estableció de forma convincente que, de la misma forma que usted puede ser unívocamente identificado por la pauta de las líneas de sus huellas dactilares, también una especie atómica está unívocamente identificada por la pauta de longitudes de onda de la luz que emite (y también absorbe).

En las décadas siguientes, los astrónomos que examinaron las longitudes de onda de la luz recogida de fuentes astrofísicas cada vez más lejanas advirtieron una característica peculiar. Aunque la colección de longitudes de onda se parecía a las que resultaban familiares en experimentos de laboratorio con átomos bien conocidos tales como hidrógeno y helio, todas ellas eran algo más largas. Para una fuente distante, las longitudes de onda podrían ser un 3 por 100 mayores; para otra fuente, un 12 por 100 mayores; para una tercera fuente, un 21 por 100 mayores. Los astrónomos llamaron a este efecto *desplazamiento hacia el rojo*, en reconocimiento de que cuando se llega a longitudes de onda cada vez más largas, al menos en la parte visible del espectro, éstas se hacen cada vez más rojas.

Poner nombre está bien para empezar, pero ¿qué es lo que hace que las longitudes de onda se estiren? La respuesta bien conocida, que surgió de manera muy clara a partir de las observaciones de Vesto Slipher y Edwin Hubble, es que el universo se está expandiendo. El ejemplo del mapa estático antes intro-

ducido está hecho a medida para ofrecer una explicación intuitiva.

Imagine una onda luminosa que viaja desde una galaxia hacia la Tierra. Cuando representamos el avance de la luz a través de nuestro mapa invariable, vemos una sucesión uniforme de crestas de onda, una tras otra, conforme el tren de ondas no perturbado se dirige hacia nuestro telescopio. La uniformidad de las ondas podría llevarle a pensar que la longitud de onda de la luz cuando fue emitida (la distancia entre crestas de onda sucesivas) no habrá variado cuando se reciba. Pero la parte más interesante de la historia surge cuando utilizamos la leyenda del mapa para convertir distancias en el mapa en distancias reales. Puesto que el universo se está expandiendo, el factor de conversión del mapa es mayor cuando la luz concluye su viaje que lo era al inicio. La consecuencia es que aunque la longitud de onda de la luz medida en el mapa es invariable, cuando se convierte en distancias reales la longitud de onda *crece*. Cuando finalmente recibimos la luz, su longitud de onda es mayor que cuando fue emitida. Es como si las ondas luminosas fueran puntadas de hilo en una pieza de látex. Así como al estirar el látex se estiran las puntadas, también la expansión del tejido del espacio estira las ondas luminosas.

Podemos ser cuantitativos. Si la longitud de onda aparece estirada en un 3 por 100, entonces el universo es un 3 por 100 mayor ahora que lo era cuando la luz fue emitida; si la luz aparece un 21 por 100 más larga, entonces el universo se ha estirado un 21 por 100 desde que la luz empezó su viaje. Las medidas del desplazamiento hacia el rojo nos dicen así el tamaño del universo cuando fue emitida la luz que ahora examinamos, comparado con el tamaño actual del universo.[85]

Queda un sencillo paso final para explotar una *serie* de tales medidas de desplazamientos hacia el rojo como una determinación del perfil de expansión del universo con el tiempo.

Una marca de lápiz trazada hace tiempo en la pared de la habitación de su hijo registra cuál era su altura en esa fecha. Una serie de marcas de lápiz da su altura en una serie de fechas. Dadas marcas suficientes, usted puede determinar con qué rapidez crecía en diferentes momentos en el pasado. Un estirón a los nueve años, un período más lento hasta los once, otro estirón a los trece, y así sucesivamente. Cuando los astrónomos miden el desplazamiento hacia el rojo de una supernova Tipo Ia, están determinando algo análogo a una «marca de lápiz» para el espacio. Como sucede con las marcas de la altura de su hijo, una serie de medidas de desplazamiento hacia el rojo de varias supernovas Tipo Ia les permitirían calcular con qué rapidez estaba creciendo el universo durante diversos intervalos en el pasado. Con esos datos, los astrónomos podrían determinar a su vez el ritmo al que se ha estado frenando la expansión del espacio. Ése era el plan de ataque establecido por los equipos de investigación.

Para ejecutarlo, tenían que completar un último paso: datar las marcas de lápiz del universo. Los equipos tenían que determinar cuándo fue emitida la luz procedente de una supernova dada. Esto es una tarea simple. Puesto que la diferencia entre los brillos aparente e intrínseco de una supernova revela su distancia, y puesto que conocemos la velocidad de la luz, deberíamos ser capaces de calcular inmediatamente cuánto tiempo hace que se emitió la luz. El razonamiento es correcto, pero hay una sutileza esencial, que tiene que ver con el antes mencionado estiramiento «posfacto» de la trayectoria de la luz, que vale la pena destacar.

Cuando la luz viaja en un universo en expansión, cubre una distancia dada debido en parte a su velocidad intrínseca a través del espacio, pero también debido en parte al estiramiento del propio espacio. Se puede comparar esto con lo que sucede en el pasillo mecánico deslizante de un aeropuerto. Sin aumentar

su velocidad intrínseca, usted viaja más lejos de lo que viajaría de no haber pasillo, porque el pasillo deslizante aumenta su movimiento. Del mismo modo, sin incrementar su velocidad intrínseca, la luz procedente de una supernova distante viaja más lejos de lo que viajaría en ausencia de estiramiento, porque durante su viaje el estiramiento del espacio aumenta su movimiento. Para estimar correctamente cuándo fue emitida la luz que vemos ahora, debemos tener en cuenta ambas contribuciones a la distancia cubierta. Las matemáticas se hacen algo complicadas (vea las notas si es curioso), pero ahora son plenamente entendidas.[86]

Siendo cuidadosos en esto, así como en muchos otros detalles teóricos y observacionales, ambos grupos pudieron calcular el tamaño del factor de escala del universo en varios momentos identificables en el pasado. Es decir, pudieron encontrar una serie de marcas de lápiz datada que delineaba el tamaño del universo, y por consiguiente pudieron determinar cómo ha estado cambiando el ritmo de expansión durante la historia del cosmos.

Aceleración cósmica

Después de comprobar, y volver a comprobar, y hacer nuevas comprobaciones, ambos equipos difundieron sus conclusiones. Durante los últimos siete mil millones de años, contrariamente a las expectativas, la expansión del espacio no se ha estado frenando. *Se ha estado acelerando.*

Un resumen de este trabajo pionero, junto con posteriores observaciones que todavía precisan más el argumento, se da en la Figura 6.2. Las observaciones revelaron que hasta hace unos

siete mil millones de años el factor de escala se comportó realmente como se esperaba: su crecimiento se frenó poco a poco. Si esto hubiera continuado, la gráfica se habría hecho horizontal o incluso se hubiera curvado hacia abajo. Pero los datos muestran que aproximadamente en la marca de los siete mil millones de años sucedió algo espectacular. La gráfica se curvó hacia arriba, lo que significa que el ritmo de crecimiento del factor de escala empezó a aumentar. El universo puso la marcha directa cuando la expansión del espacio empezó a acelerarse.

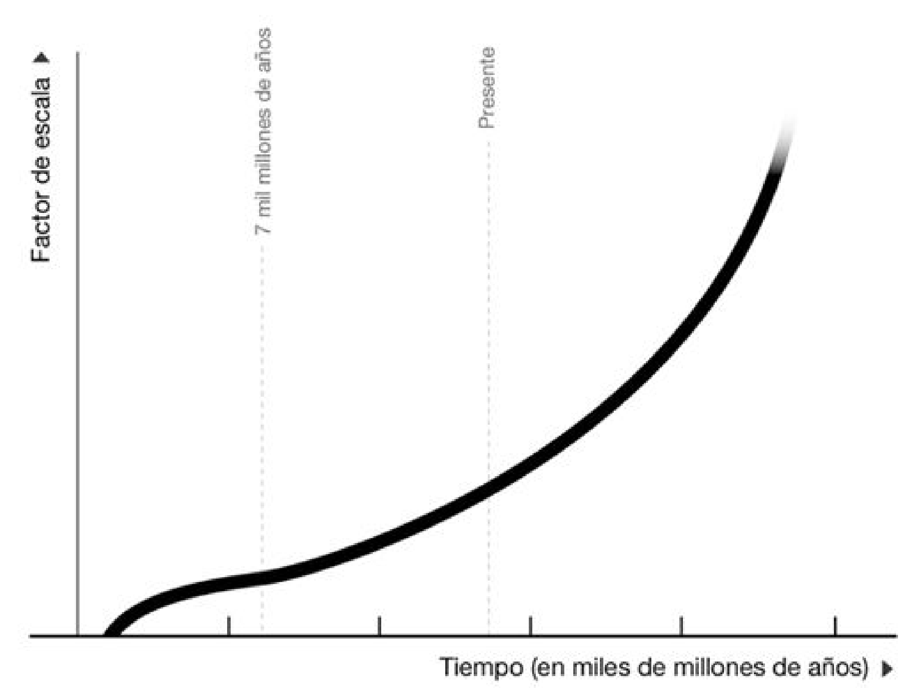


FIGURA 6.2. El factor de escala del universo a lo largo del tiempo, que muestra que la expansión cósmica se estuvo frenando hasta hace unos siete mil millones de años, momento en que empezó a acelerarse.

Nuestro destino cósmico se muestra en la forma de esta gráfica. Con expansión acelerada, el espacio continuará extendiéndose indefinidamente, arrastrando las galaxias y separándolas

cada vez más. Dentro de cien mil millones de años, cualquier galaxia que ahora resida en nuestra vecindad (un cúmulo ligado gravitatoriamente de aproximadamente una docena de galaxias, llamado nuestro «grupo local») saldrá de nuestro horizonte cósmico y entrará en un dominio que está permanentemente más allá de lo que podemos ver. A menos que los astrónomos futuros tengan a mano registros de ellas en una época anterior, sus teorías cosmológicas buscarán explicaciones para un universo isla, con galaxias no más numerosas que estudiantes en una escuela rural, flotando en un estático mar de oscuridad. Nosotros vivimos en una era privilegiada. Ideas que el universo dio, la expansión acelerada se llevará.

Como veremos en las páginas que siguen, la visión limitada que se ofrece a los astrónomos futuros es más sorprendente cuando se compara con la enormidad de la extensión cósmica a la que ha sido llevada nuestra generación al intentar explicar la expansión acelerada.

La constante cosmológica

Si usted viera que la velocidad de una bola *aumenta* después de que alguien la haya lanzado hacia arriba, concluiría que algo la estaba empujando desde la superficie de la Tierra. Del mismo modo, los investigadores de supernovas concluyeron que la inesperada aceleración del éxodo cósmico requería algo que empujara hacia fuera, algo que superara al tirón hacia dentro de la gravedad atractiva. Como ahora nos es muy familiar, esta misma descripción es lo que hace de la constante cosmológica, y la gravedad repulsiva a que da lugar, el candidato ideal. Las observaciones de supernovas volvieron a traer a primer plano a

la constante cosmológica, no mediante el «mal juez de la convicción» al que Einstein había aludido en su carta décadas antes, sino mediante los datos puros y duros.

Los datos también permitieron a los investigadores fijar el valor numérico de la constante cosmológica —la cantidad de energía oscura que llena el espacio—. Expresando el resultado en términos de una cantidad equivalente de masa, como es convencional entre físicos (utilizando $E = mc^2$ en la forma menos familiar, $m = E/c^2$), los investigadores demostraron que los datos de las supernovas requerían una constante cosmológica apenas por debajo de 10^{-29} gramos por cada centímetro cúbico.[87] El empujón hacia fuera de una constante cosmológica tan pequeña habría sido superado durante los primeros siete mil millones de años por el tirón hacia dentro de la materia y la energía ordinarias, en acuerdo con los datos observacionales. Pero la expansión del espacio habría diluido la materia y la energía ordinarias, lo que permitió que en última instancia la constante cosmológica ganara la mano. Recuerde: la constante cosmológica no se diluye; la gravedad repulsiva suministrada por una constante cosmológica es una característica intrínseca del espacio —cada metro cúbico de espacio aporta el mismo empujón hacia fuera, dictado por el valor de la constante cosmológica—. Y así, cuanto más espacio hay entre dos objetos, surgido de la expansión cósmica, mayor es la fuerza que los separa. Aproximadamente en la marca de siete mil millones de años, la gravedad repulsiva de la constante cosmológica habría dominado; la expansión del universo se ha estado acelerando desde entonces, precisamente como atestiguan los datos en la Figura 6.2.

Para atenerme por completo a la convención, debería reexpresar el valor de la constante cosmológica en las unidades más utilizadas por los físicos. Usted no pediría a un tendero 10^{15} picogramos de patatas (en su lugar, usted habría pedido 1 kilo-

gramo, una medida equivalente en unidades más razonables), ni le diría a una amiga que le espera que estará con ella dentro de 10^9 nanosegundos (en su lugar, usted habría dicho 1 segundo, una medida equivalente en unidades más razonables). Igualmente extraño resulta que un físico cite la energía de la constante cosmológica en gramos por centímetro cúbico. En su lugar, por razones que pronto se harán evidentes, la elección natural es expresar el valor de la constante cosmológica como un múltiplo de la denominada masa de Planck (unos 10^{-5} gramos) por longitud de Planck al cubo (un cubo que mide 10^{-33} centímetros de lado y por lo tanto tiene un volumen de 10^{-99} centímetros). En estas unidades, el valor medido de la constante cosmológica es del orden de 10^{-123}, el número minúsculo que abría este capítulo.[88]

¿Hasta qué punto estamos seguros de este resultado? Los datos que afirman la expansión acelerada se han hecho más concluyentes en los años transcurridos desde que se hizo la primera medida. Además, medidas complementarias (centradas, por ejemplo, en características detalladas de la radiación de fondo de microondas; véase *El tejido del cosmos*, capítulo 14) encajan espectacularmente bien con los resultados de supernovas. Si hay margen de maniobra, está en lo que aceptemos como explicación para la expansión acelerada. Tomando la relatividad general como descripción matemática de la gravedad, la única opción es la antigravedad de una constante cosmológica. Surgen otras explicaciones si modificamos esta imagen incluyendo exóticos campos cuánticos adicionales (que, igual que encontramos en la cosmología inflacionaria, pueden enmascararse durante períodos de tiempo como una constante cosmológica), [89] o alterar las ecuaciones de la relatividad general (de modo que la intensidad de la gravedad atractiva disminuya con la separación de una forma mucho más rápida que lo hace de acuerdo con las matemáticas de Newton o de Einstein, lo que per-

mite que regiones distantes se alejen más rápidamente, sin requerir una constante cosmológica). Pero hasta la fecha, la explicación más simple y más convincente para las observaciones de la expansión acelerada es que la constante cosmológica no se anula, y por ello el espacio está lleno de energía oscura.

Para muchos investigadores, el descubrimiento de una constante cosmológica distinta de cero es el resultado observacional más sorprendente que han visto en su vida.

Explicando el cero

Cuando conocí los resultados de supernovas que sugerían una constante cosmológica no nula mi reacción fue la típica de muchos físicos. «Sencillamente es imposible». La mayoría de los teóricos (aunque no todos) había concluido décadas antes que el valor de la constante cosmológica era cero. Esta opinión fue inicialmente una consecuencia de la historia del «mayor patinazo de Einstein», pero con el tiempo surgieron varios argumentos convincentes en su apoyo. El más poderoso venía de consideraciones sobre la incertidumbre cuántica.

Debido a la incertidumbre cuántica y a las consiguientes fluctuaciones que experimentan todos los campos cuánticos, incluso el espacio vacío es sede de una frenética actividad microscópica. Y de la misma forma que los átomos que rebotan en una caja o los niños que saltan en un patio de recreo, las fluctuaciones cuánticas llevan energía. Pero a diferencia de los átomos o los niños, las fluctuaciones cuánticas son ubicuas e inevitables. Usted no puede declarar cerrada una región del espacio y enviar a casa a las fluctuaciones cuánticas; la energía que suministran las fluctuaciones cuánticas permea el espacio y

no puede eliminarse. Puesto que la constante cosmológica no es otra cosa que energía que permea el espacio, las fluctuaciones de los campos cuánticos proporcionan un mecanismo microscópico que genera una constante cosmológica. Ésa es una idea capital. Usted recordará que cuando Einstein introdujo la noción de una constante cosmológica, lo hizo de forma abstracta —no especificó lo que podría ser, de dónde podría venir o cómo podría aparecer—. El vínculo con las fluctuaciones cuánticas hacía inevitable que lo que Einstein no había imaginado sobre la constante cosmológica, lo pensara posteriormente alguien comprometido con la física cuántica. Una vez que se tiene en cuenta la mecánica cuántica, uno está obligado a aceptar una contribución de energía proporcionada por campos que está uniformemente distribuida por el espacio, y así se ve llevado directamente a la noción de una constante cosmológica.

La cuestión que esto plantea es una cuestión de detalle numérico. ¿*Cuánta energía está contenida en estas omnipresentes agitaciones cuánticas*? Cuando los teóricos calcularon la respuesta obtuvieron un resultado ridículo: debería haber una cantidad infinita de energía en cada volumen de espacio. Para ver por qué, pensemos en un campo que fluctúa dentro de una caja vacía de tamaño cualquiera. La Figura 6.3 muestra algunas formas que pueden tomar las fluctuaciones. Cada fluctuación contribuye al contenido de energía del campo (de hecho, cuanto más corta es la longitud de onda, más rápida es la fluctuación y mayor es la energía). Y puesto que hay infinitas formas de onda posibles, cada una con una longitud de onda menor que la anterior, la energía total contenida en las fluctuaciones es infinita.[90]

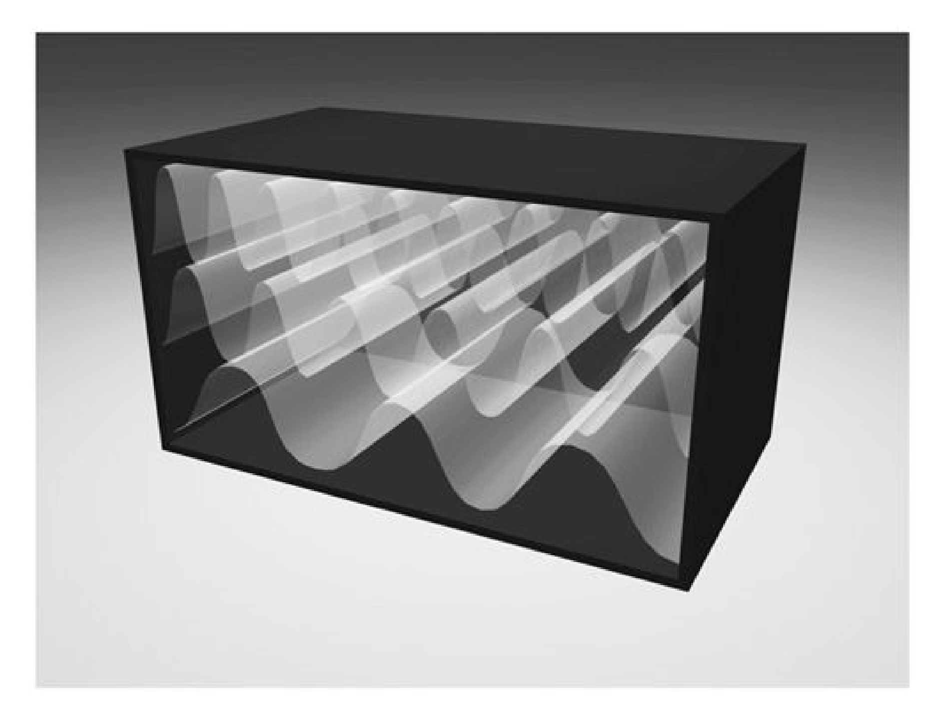


FIGURA 6.3. Hay infinitas formas de ondas en cualquier volumen, y con ello infinitas fluctuaciones cuánticas distintas. Esto da el resultado problemático de una contribución infinita de energía.

Aunque claramente inaceptable, el resultado no generó ataques de apoplejía porque los investigadores lo reconocieron como un síntoma del problema más general y bien conocido que discutimos antes: la hostilidad entre gravedad y mecánica cuántica. Todos sabían que no se puede confiar en la teoría cuántica de campos en escalas de distancias superpequeñas. Fluctuaciones con longitudes de onda tan pequeñas como la escala de Planck, 10^{-33} centímetros, y menores, tienen una energía (y por $m = E/c^2$, masa equivalente) tan grande que la fuerza gravitatoria cuenta. Describirlas adecuadamente requiere un marco que combine mecánica cuántica y relatividad general. Conceptualmente, esto desplaza la discusión a la teoría de cuerdas, o a cualquier otra teoría cuántica propuesta que incluya la grave-

dad. Pero la respuesta inmediata y más pragmática entre investigadores era simplemente declarar que los cálculos deberían despreciar las fluctuaciones en escalas menores que la longitud de Planck. Si no se excluyeran estas fluctuaciones, un cálculo en teoría cuántica de campos se extendería a un dominio claramente más allá de su rango de validez. Existía la esperanza de que un día entenderíamos la teoría de cuerdas o la gravedad cuántica suficientemente bien como para tratar cuantitativamente las fluctuaciones superpequeñas, pero el recurso provisional era poner en cuarentena matemáticamente las fluctuaciones más perniciosas. El contenido de la directiva es claro: si se ignoran fluctuaciones más pequeñas que la longitud de Planck, sólo quedan un número finito, de modo que la energía total que aportan a una región de espacio vacío es también finita.

Eso es un avance. O, cuando menos, remite la discusión a ideas futuras que, crucemos los dedos, aplacarían las fluctuaciones cuánticas de longitud de onda superpequeña. Pero incluso así, los investigadores encontraron que la respuesta resultante para las fluctuaciones de energía, aunque finita, seguía siendo gigantesca, de unos 10^{94} gramos por centímetro cúbico. Esto es mucho mayor que lo que se obtendría comprimiendo en un dedal todas las estrellas de todas las galaxias conocidas. Centrándonos en un cubo infinitesimal, uno que tiene un lado de una longitud de Planck, esta estupenda densidad equivale a 10^{-5} gramos por longitud de Planck cúbica, o 1 masa de Planck por volumen de Planck (que es la razón por la que estas unidades, como los kilos para las patatas y los segundos para la espera, son la elección natural y razonable). Una constante cosmológica de esta magnitud impulsaría un brote expansivo tan enormemente rápido que cualquier cosa, desde galaxias hasta átomos, sería desgarrada. En términos más cuantitativos, las observaciones astronómicas habían establecido un límite estricto al valor que podía tener una constante cosmológica, si es que hubiera una, y

los resultados teóricos superaban el límite en un asombroso factor de más de cien órdenes de magnitud. Aunque un número finito grande para la energía que llena el espacio es mejor que un número infinito, los físicos comprendieron la urgente necesidad de reducir drásticamente el resultado de sus cálculos.

Aquí es donde sale a relucir el prejuicio teórico. Supongamos por el momento que la constante cosmológica no sólo es pequeña, sino que es cero. Cero es un número favorito para los teóricos, porque hay una manera probada y segura de que surja de los cálculos: la simetría. Por ejemplo, imaginemos que Arturo se ha matriculado en un curso de formación continua y se le ha propuesto como tarea sumar las sexagesimoterceras potencias de los diez primeros números positivos, $1^{63} + 2^{63} + 3^{63} + 4^{63} + 5^{63} + 6^{63} + 7^{63} + 8^{63} + 9^{63} + 10^{63}$, y luego sumar el resultado a la suma de las sexagesimoterceras potencias de los diez primeros números negativos, $(-1)^{63} + (-2)^{63} + (-3)^{63} + (-4)^{63} + (-5)^{63} + (-6)^{63} + (-7)^{63} + (-8)^{63} + (-)9^{63} + (-10)^{63}$. ¿Cuál es el resultado final? Mientras él está calculando laboriosamente, cada vez más frustrado, multiplicando y luego sumando números de más de doce cifras, Elisa le dice: «Utiliza la simetría, Arturo». «¿Qué?». Lo que ella quiere decir es que cada término en la primera colección tiene un término simétrico que lo compensa en la segunda: 1^{63} y $(-1)^{63}$ suman 0 (un número negativo elevado a una potencia impar sigue siendo negativo); 2^{63} y $(-2)^{63}$ suman 0, y así sucesivamente. La simetría entre las expresiones da como resultado una anulación completa, como si fueran niños del mismo peso colocados en lados opuestos de un balancín. Sin necesidad de cálculos, Elisa muestra que la respuesta es 0.

Muchos físicos creían —o, debería decir, esperaban— que una análoga anulación total debida a una simetría todavía no identificada en las leyes de la física ahorraría el cálculo de la energía contenida en las fluctuaciones cuánticas. Los físicos suponían que las enormes energías de las fluctuaciones cuánticas

se anularían con unas enormes contribuciones compensadoras todavía no identificadas, una vez que la física fuera suficientemente bien entendida. Ésta era la única estrategia posible con la que podían dar los físicos para apisonar los resultados disparatados que daban los cálculos groseros. Y ésa es la razón por la que muchos teóricos concluyeron que la constante cosmológica tenía que ser cero.

La supersimetría proporciona un ejemplo concreto de cómo podría producirse. Recordemos del capítulo 4 (Tabla 4.1) que la supersimetría implica un emparejamiento de tipos de partículas, y por lo tanto de tipos de campos; los electrones se emparejan con un tipo de partículas llamado electrones supersimétricos, o selectrones para abreviar; los quarks con squarks; los neutrinos con sneutrinos, y así sucesivamente. Todos estos tipos de «spartículas» son de momento hipotéticos, pero esto puede cambiar con los experimentos que se realizarán en los próximos años en el Gran Colisionador de Hadrones. En cualquier caso, un hecho intrigante salió a la luz cuando los teóricos examinaron matemáticamente las fluctuaciones cuánticas asociadas a cada uno de los campos emparejados. Por cada fluctuación del primer campo, hay una correspondiente fluctuación de su compañero que tiene el mismo tamaño pero signo contrario, igual que en la tarea de Arturo. E igual que en este ejemplo, cuando sumamos todas las contribuciones, par por par, ellas se anulan, lo que da un resultado final de cero.[91]

La pega, y es grande, es que la anulación total sólo ocurre si ambos miembros de un par tienen no sólo las mismas cargas eléctrica y nuclear (que las tienen), sino también la misma masa. Los datos experimentales lo han descartado. Incluso si la naturaleza hace uso de la supersimetría, los datos muestran que no puede realizarse en su forma más potente. Las partículas aún desconocidas (selectrones, squarks, sneutrinos, y así sucesivamente) deben ser mucho más pesadas que sus contrapartidas

conocidas; sólo esto puede explicar por qué no se han visto en experimentos en aceleradores. Cuando se tienen en cuenta las diferentes masas de las partículas, la simetría se rompe, el balance se desequilibra y las anulaciones son imperfectas; el resultado es una vez más enorme.

Con los años se han presentado muchas propuestas análogas, que invocan una gama de principios de simetría y mecanismos de anulación adicionales, pero ninguna consiguió el objetivo de establecer teóricamente que la constante cosmológica debería desaparecer. Incluso así, la mayoría de los investigadores tomó esto meramente como un síntoma de nuestro conocimiento incompleto de la física, no como una clave de que la creencia en una constante cosmológica nula era errónea.

Un físico que desafió la ortodoxia fue el premio Nobel Steven Weinberg.[92] En un artículo publicado en 1987, más de una década antes de las revolucionarias medidas de supernovas, Weinberg sugirió un esquema teórico alternativo que daba un resultado decididamente diferente: una constante cosmológica que es pequeña *pero no cero*. Los cálculos de Weinberg se basaban en uno de los conceptos más controvertidos que han afectado a la comunidad física en décadas, un principio que unos reverencian y otros vilipendian, un principio que unos califican de profundo y otros califican de estúpido. Su nombre oficial, aunque equívoco, es el *principio antrópico*.

Antropía cosmológica

El modelo heliocéntrico de Nicolás Copérnico para el sistema solar está reconocido como la primera demostración científica convincente de que los seres humanos no somos el centro

del cosmos. Los descubrimientos modernos han reforzado la lección con creces. Ahora comprendemos que el resultado de Copérnico no es sino una en una serie de degradaciones anidadas que destronan viejas hipótesis relativas al estatus especial de la humanidad: nosotros no estamos situados en el centro del sistema solar, no estamos situados en el centro de la galaxia, no estamos situados en el centro del universo, ni siquiera estamos hechos de los oscuros ingredientes que constituyen la inmensa mayoría de la masa del universo. Tal degradación cósmica, de protagonista a secundario, ejemplifica lo que los científicos llaman ahora el *principio copernicano*: en el gran esquema de las cosas, todo lo que sabemos apunta a que los seres humanos no ocupamos una posición privilegiada.

Casi quinientos años después del trabajo de Copérnico se celebró en Cracovia una conferencia conmemorativa. En ella, una comunicación en particular —presentada por el físico australiano Brandon Carter— proporcionó un giro seductor al principio copernicano. Carter expuso su creencia en que una adhesión demasiado estricta a la perspectiva copernicana podría, en ciertas circunstancias, apartar a los investigadores de importantes oportunidades para hacer progresos. Es cierto, aceptaba Carter, los seres humanos no somos centrales para el orden cósmico. Pero, continuaba, alineándose con ideas similares expresadas por científicos como Alfred Russel Wallace, Abraham Zelmanov y Robert Dicke, hay un escenario en el que representamos un papel absolutamente indispensable: nuestras propias observaciones. Por mucho que hayamos sido degradados por Copérnico y su legado, encabezamos los títulos de crédito en la recogida y el análisis de los datos que moldean nuestras creencias. Debido a esta posición inevitable, debemos tener en cuenta lo que los estadísticos llaman *sesgo de selección*.

Es una idea sencilla y de aplicación general. Si usted está investigando poblaciones de truchas pero sólo explora el desierto

del Sahara, sus datos estarán sesgados por su fijación en un ambiente particularmente inhóspito para su tema. Si está estudiando el interés del gran público por la ópera, pero envía su encuesta solamente a la base de datos recogida por la revista *No podemos vivir sin ópera*, sus resultados no serán precisos, porque los encuestados no son representativos de la población general. Si usted está entrevistando a un grupo de refugiados que han soportado condiciones extraordinariamente duras durante su viaje a la salvación, podría concluir que están entre las etnias más resistentes del planeta. Pero cuando usted conoce el hecho devastador de que está hablando con menos de un 1 por 100 de quienes partieron, se da cuenta de que esa deducción está sesgada, porque sólo los extraordinariamente fuertes sobrevivieron al viaje.

Abordar estos sesgos es vital para obtener resultados significativos y para evitar una fútil investigación que trate de explicar conclusiones basadas en datos poco representativos. ¿Por qué están extintas las truchas? ¿Cuál es la causa del súbito interés del público por la ópera? ¿Por qué es esa etnia concreta tan sorprendentemente resistente? Observaciones sesgadas pueden llevarle a búsquedas absurdas para explicar cosas que una visión más amplia y representativa hace triviales.

En la mayoría de los casos, sesgos de este tipo son fácilmente identificados y corregidos. Pero hay un tipo de sesgos que es más sutil, uno tan básico que fácilmente puede ser pasado por alto. Es el tipo en el que limitaciones sobre cuándo y dónde somos capaces de vivir pueden tener un impacto profundo sobre lo que somos capaces de ver. Si no tenemos en cuenta adecuadamente el impacto que tales limitaciones intrínsecas tienen sobre nuestras observaciones, entonces, como en los ejemplos anteriores, podemos extraer conclusiones disparatadas, incluidas algunas que pueden llevarnos a viajes infructuosos para explicar MacGuffins sin significado.

Por ejemplo, imagine que usted intenta comprender (como lo intentaba el gran científico Johannes Kepler) por qué la Tierra está a 150 millones de kilómetros del Sol. Quiere encontrar, en el interior profundo de las leyes de la física, algo que explique este hecho observacional. Durante años usted se esfuerza con denuedo, pero es incapaz de sintetizar una explicación convincente. ¿Debería seguir intentándolo? Bien, si reflexiona sobre sus esfuerzos, teniendo en cuenta el sesgo de selección, pronto comprenderá que busca algo imposible.

Las leyes de la gravedad, la de Newton tanto como la de Einstein, admiten que un planeta orbite en torno a una estrella a cualquier distancia. Si usted agarrara la Tierra, la moviera a una distancia arbitraria del Sol y luego la pusiera otra vez en movimiento a la velocidad correcta (una velocidad fácil de calcular con física básica), entraría en órbita sin problemas. Lo único especial de estar a 150 millones de kilómetros del Sol es que da un rango de temperaturas en la Tierra que nos permite estar aquí. Si la Tierra estuviera mucho más cerca o mucho más lejos del Sol, la temperatura sería mucho más caliente o mucho más fría, lo que eliminaría un ingrediente esencial para nuestra forma de vida: el agua líquida. Esto revela el sesgo incorporado. El hecho mismo de que nosotros medimos la distancia de nuestro planeta al Sol requiere que el resultado que encontramos debe estar dentro del rango limitado compatible con nuestra propia existencia. De lo contrario, no estaríamos aquí para contemplar la distancia de la Tierra al Sol.

Si la Tierra fuera el único planeta en el sistema solar, o el único planeta en el universo, usted podría sentirse impulsado a llevar más lejos su investigación. De acuerdo, podría decir usted, entiendo que mi propia existencia está ligada a la distancia de la Tierra al Sol, pero esto sólo refuerza mi impulso para explicar por qué la Tierra está casualmente situada en una posi-

ción tan confortable y compatible con la vida. ¿Es esto tan sólo una feliz coincidencia? ¿Hay una explicación más profunda?

Pero la Tierra no es el único planeta en el universo, y ni siquiera en el sistema solar. Hay muchos otros. Y este hecho arroja una luz muy diferente sobre estas preguntas. Para ver lo que quiero decir, imagine que usted piensa erróneamente que una zapatería concreta sólo vende un único número de zapato, y por ello usted queda agradablemente sorprendido cuando el dependiente le trae un par que encaja perfectamente. «De todos los números de zapato posibles», reflexiona usted, «es sorprendente que el único que tienen es el mío. ¿Es esto tan sólo una feliz coincidencia? ¿Hay una explicación más profunda?». Pero en cuanto usted sabe que la zapatería vende en realidad una amplia gama de números, las preguntas se evaporan. Un universo con muchos planetas, situados a varias distancias de sus estrellas anfitrionas, presenta una situación similar. Del mismo modo que no es una gran sorpresa que entre todos los zapatos en la zapatería haya al menos un par que le encajan, tampoco es una gran sorpresa que entre todos los planetas del sistema solar haya al menos uno a la distancia correcta de su estrella anfitriona que dé un clima favorable para nuestra forma de vida. Y es en uno de estos planetas, por supuesto, en el que vivimos. Sencillamente no podríamos evolucionar o sobrevivir en los otros.

De modo que no hay ninguna razón fundamental por la que la Tierra está a 150 millones de kilómetros del Sol. La distancia orbital de un planeta a su estrella anfitriona se debe a los caprichos del azar histórico, las innumerables características detalladas de la nube de gas arremolinado a partir de la cual se formó un sistema solar concreto; es un hecho contingente que no es susceptible de una explicación fundamental. De hecho, estos procesos astrofísicos han producido planetas por todo el cosmos, en órbita en torno a sus respectivos soles a una gran variedad de distancias. Nosotros nos encontramos en uno de es-

tos planetas, situado a 150 millones de kilómetros de nuestro Sol porque éste es un planeta en el que nuestra forma de vida puede evolucionar. No tener en cuenta este sesgo de selección llevaría a buscar una respuesta más profunda. Pero eso es una tarea de locos.

El artículo de Carter resaltaba la importancia de prestar atención a dicho sesgo, una actuación que él llamó el principio antrópico (un nombre desafortunado, porque la idea se aplicaría igualmente a cualquier forma de vida inteligente que haga y analice observaciones, no sólo a los humanos). Nadie puso reparos a este elemento del argumento de Carter. La parte controvertida era su sugerencia de que el principio antrópico podría arrojar su luz no sólo sobre cosas en el universo, como distancias planetarias, sino sobre el propio universo.

¿Qué significaría esto?

Imagine que usted se siente intrigado por alguna característica fundamental del universo, digamos la masa de un electrón, 0,00054 (expresada como una fracción de la masa del protón), o la intensidad de la fuerza electromagnética, 0,0073 (expresada por su constante de acoplamiento), o, de gran interés para nosotros aquí, el valor de la constante cosmológica, $1{,}38 \times 10^{-123}$ (expresado en unidades de Planck). Su intención es explicar por qué estas constantes tienen estos valores concretos. Lo intenta una y otra vez pero acaba con las manos vacías. Retroceda un paso, dice Carter. Quizá usted está fracasando por la misma razón que fracasó en explicar la distancia Tierra-Sol: no hay una explicación fundamental. Igual que hay muchos planetas a muchas distancias y necesariamente habitamos uno cuya órbita proporciona condiciones habitables, quizá haya muchos universos con muchos valores diferentes para las «constantes» y necesariamente habitamos uno en el que los valores son favorables para nuestra existencia.

En esta línea de pensamiento, preguntar por qué las constantes tienen sus valores concretos es plantear la pregunta equivocada. No hay ninguna ley que dicte sus valores: estos valores pueden variar, y lo hacen, a lo largo del multiverso. Nuestro sesgo de selección intrínseco asegura que nos encontramos en esa parte del multiverso en la que las constantes tienen los valores que nos son familiares simplemente porque no podemos existir en las partes del universo donde los valores son diferentes.

Note que el razonamiento se desharía si nuestro universo fuera único porque usted aún podría plantear las cuestiones «feliz coincidencia» o «explicación más profunda». Así como una explicación convincente de por qué la zapatería tiene su número de zapato requiere que en las estanterías haya muchos números diferentes, e igual que una explicación convincente de por qué hay un planeta situado a una distancia bioamigable de su estrella anfitriona requiere planetas que orbiten en torno a sus estrellas a muchas distancias diferentes, también una explicación convincente de las constantes de la naturaleza requiere una inmensa colección de universos dotados con muchos valores diferentes para dichas constantes. Sólo en este sistema —un multiverso, y uno robusto en ello— el razonamiento antrópico tiene la capacidad de hacer trivial lo misterioso.[93]

Evidentemente, entonces, el grado en el que usted es influido por el enfoque antrópico depende del grado en que usted está convencido de sus tres hipótesis esenciales: (1) nuestro universo es parte de un multiverso; (2) de un universo a otro en el multiverso, las constantes toman un amplio rango de valores posibles; y (3) en la mayoría de los casos, las variaciones de las constantes respecto a los valores que medimos no harían posible sostener la vida tal como la conocemos.

En los años setenta del siglo pasado, cuando Carter presentó estas ideas, la noción de universos paralelos era anatema para

muchos físicos. Ciertamente sigue habiendo muchas razones para ser escéptico. Pero hemos visto en capítulos anteriores que aunque el argumento a favor de cualquier versión concreta del multiverso es por supuesto provisional, hay una razón para considerar seriamente esta nueva visión de la realidad, la hipótesis 1. Muchos científicos lo hacen ahora. Asimismo, con respecto a la hipótesis 2, hemos visto que, por ejemplo, en los multiversos inflacionario y brana cabría esperar que características físicas tales como las constantes de la naturaleza varíen de un universo a otro. Más adelante en este capítulo examinaremos este punto con más detalle.

Pero ¿qué pasa con la hipótesis 3, concerniente a la vida y las constantes?

La vida, las galaxias y los números de la naturaleza

Para muchas de las constantes de la naturaleza, incluso modestas variaciones harían imposible la vida tal como la conocemos. Hagamos más intensa la constante gravitatoria, y las estrellas se consumirán con demasiada rapidez para que evolucione la vida en planetas cercanos. Hagámosla más débil, y las galaxias se disgregan. Hagamos la fuerza electromagnética más fuerte, y los núcleos de hidrógeno se repelen con demasiada intensidad para poder fusionarse y suministrar energía a las estrellas.[94] Pero ¿qué pasa con la constante cosmológica? ¿Depende de su valor la existencia de vida? Ésta era la pregunta que asumió Steven Weinberg en su artículo de 1987.

Puesto que la formación de vida es un proceso complejo acerca del cual nuestro conocimiento está en sus etapas más tempranas, Weinberg reconoció que era casi imposible determi-

nar si un valor u otro de la constante cosmológica tiene un impacto directo en la miríada de pasos que insuflan vida en la materia. Pero en lugar de abandonar, Weinberg consideró un proceso clave para la formación de vida: la formación de galaxias. Sin galaxias, razonaba él, la formación de estrellas y planetas estaría seriamente comprometida, con un impacto devastador en la probabilidad de que la vida pudiera emerger. Este enfoque no sólo era completamente razonable, sino también útil: desplazaba el foco hacia la determinación del impacto que tendrían constantes cosmológicas de varios tamaños en la formación de galaxias, y ése era un problema que Weinberg podía resolver.

La física esencial es elemental. Aunque los detalles precisos de la formación de galaxias son un área activa de investigación, el proceso a trazos gruesos implica una especie de efecto bola de nieve astrofísico. Un trozo de materia se forma aquí o allá, y en virtud de ser más denso que sus entornos, ejerce un mayor tirón gravitatorio sobre la materia vecina y con ello se hace aún más grande. El ciclo continúa realimentándose hasta producir finalmente una masa arremolinada de gas y polvo, a partir de la cual se forman estrellas y planetas. La idea de Weinberg era que una constante cosmológica con un valor suficientemente grande interrumpiría el proceso de acumulación. La gravedad repulsiva que generaría, si fuera suficientemente fuerte, impediría la formación galáctica al hacer que los grumos iniciales —que eran pequeños y frágiles— se disgregaran antes de que tuvieran tiempo de hacerse robustos atrayendo a la materia circundante.

Weinberg desarrolló la idea matemáticamente y encontró que una constante cosmológica mayor que unos pocos cientos de veces la densidad de materia cosmológica actual, unos pocos protones por metro cúbico, impediría la formación de galaxias. (Weinberg consideró también el impacto de una constante cosmológica negativa. Las restricciones en ese caso son aún más fuertes, porque un valor negativo aumenta el tirón atractivo de

la gravedad y hace que el universo entero colapse antes de que las estrellas tengan siquiera tiempo de encenderse). Si usted imagina que somos parte de un multiverso y que el valor de la constante cosmológica varía en un amplio rango de un universo a otro, igual que las distancias planeta-estrella varían en un amplio rango de un sistema solar a otro sistema solar, entonces los únicos universos que podrían tener galaxias, y con ello los únicos universos que podríamos habitar, son universos en los que la constante cosmológica no es mayor que el límite de Weinberg, que en unidades de Planck es del orden de 10^{-121}.

Tras años de esfuerzos fallidos por parte de la comunidad de físicos, éste fue el primer cálculo teórico que dio un valor para constante cosmológica que no era absurdamente mayor que los límites inferidos a partir de la astronomía observacional. Tampoco contradecía la creencia, ampliamente aceptada en la época del trabajo de Weinberg, en que la constante cosmológica se anulaba. Weinberg llevó este avance evidente un paso más allá al animar una interpretación aún más agresiva de su resultado. Sugirió que deberíamos esperar encontrarnos en un universo con una constante cosmológica cuyo valor es tan pequeño como el que se necesita para que nosotros existamos, pero no mucho menor. Una constante cosmológica mucho menor, razonaba, pediría una explicación que va más allá de la mera compatibilidad con nuestra existencia. Es decir, requeriría precisamente el tipo de explicación que la física había buscado valientemente pero que no había encontrado hasta entonces. Esto llevó a Weinberg a sugerir que medidas más refinadas podrían un día revelar que la constante cosmológica no se anula, sino que, en su lugar, tiene un valor próximo o en el límite superior del rango que él había calculado. Como hemos visto, menos de una década después del artículo de Weinberg las observaciones del Proyecto Cosmología de Supernovas y el Equipo de Bús-

queda de Supernovas de Alto Z demostraron que esta sugerencia era profética.

Pero para evaluar plenamente este poco convencional marco explicatorio, tenemos que examinar más de cerca el razonamiento de Weinberg. Éste está imaginando un multiverso tan diverso en población que sólo *tiene* que contener al menos un universo con la constante cosmológica que hemos observado. Pero ¿qué tipo de multiverso garantizará, o al menos hará altamente probable, que sea así?

Para llegar a esto, consideremos un problema análogo con números más sencillos. Imagine que usted trabaja para el infame productor cinematográfico Harvey W. Einstein, que le ha pedido que organice un *casting* para el protagonista en su nuevo film, *Pulp Friction*.[95] «¿De qué altura lo quiere?», pregunta usted. «Me da igual. Más alto que un metro, y menos que dos. Pero asegúrese de que cualquiera que sea la altura que yo decida, hay alguien que la cumple». Usted está tentado a corregir a su jefe, diciendo que debido a la incertidumbre cuántica él no necesita tener representada *cualquier* altura; pero recordando lo que sucedió con la pequeña y arisca mosca parlante con quien lo intentó, usted se retiene.

Ahora se enfrenta usted a una decisión. ¿Cuántos actores debería tener en la audición? Usted razona: si W. mide las alturas con una precisión de un centímetro, hay cien posibilidades diferentes entre uno y dos metros. De modo que usted necesita al menos un centenar de actores. Pero puesto que algunos actores que se presenten pueden tener la misma altura, lo que dejaría a otras alturas sin quedar representadas, usted haría mejor en reunir a más de un centenar. Para estar seguro, quizá debería usted llamar a algunos cientos de actores. Eso es mucho, pero menos que los que usted necesitaría si W. midiera las alturas con una precisión de un milímetro. En ese caso habría mil alturas dife-

rentes entre uno y dos metros, de modo que para estar seguro usted necesitaría reunir algunos miles de actores.

El mismo razonamiento es relevante para el caso de universos con constantes cosmológicas diferentes. Supongamos que todos los universos en un multiverso tienen valores de la constante cosmológica entre 0 y 1 (en las unidades de Planck habituales); valores menores llevan a universos que colapsan, valores mayores tensarían la aplicabilidad de nuestras formulaciones matemáticas y comprometerían toda comprensión. De modo que igual que las alturas de los actores tenían un rango de 1 (en metros), las constantes cosmológicas de los universos tienen un rango de 1 (en unidades de Planck). En cuanto a exactitud, lo análogo a W. utilizando marcas de centímetros, o marcas de milímetros, es ahora la precisión con la que podemos medir la constante cosmológica. La exactitud hoy es del orden de 10^{-124} (en unidades de Planck). En el futuro, nuestra precisión mejorará sin duda, pero como veremos, eso apenas afectará a nuestras conclusiones. Entonces, igual que hay 10^2 alturas posibles diferentes espaciadas al menos 10^{-2} metros (un centímetro) en un rango de 1 metro, y 10^3 diferentes alturas posibles espaciadas al menos 10^{-3} metros (un milímetro), también hay 10^{124} valores diferentes de la constante cosmológica espaciados al menos 10^{-124} entre los valores 0 y 1.

Para asegurar que se realiza toda posible constante cosmológica, necesitaríamos por consiguiente un multiverso con al menos 10^{124} universos diferentes. Pero como sucedía con los actores, necesitamos tener en cuenta posibles duplicados, universos que pueden tener el mismo valor de la constante cosmológica. Y por ello, para jugar seguro y hacer altamente probable que se realiza cada valor posible de la constante cosmológica, deberíamos tener un multiverso con muchos más de 10^{124} universos, digamos un millón de veces más, lo que nos lleva a 10^{130} universos. No estoy siendo muy preciso porque cuando estamos

hablando de números tan grandes, los valores exactos apenas cuentan. Ningún ejemplo familiar —ni el número de células en su cuerpo (10^{13}), ni el número de segundos transcurridos desde el big bang (10^{18}), ni el número de fotones en la parte observable del universo (10^{88})— se acerca remotamente al número de universos que estamos contemplando. La conclusión es que el enfoque de Weinberg para explicar la constante cosmológica funciona sólo si somos parte de un multiverso en el que hay un número enorme de universos diferentes; sus constantes cosmológicas deben cubrir unos 10^{124} valores distintos. Sólo con tantos universos diferentes hay una alta probabilidad de que haya uno con una constante cosmológica que encaje con la nuestra.

¿Hay marcos teóricos que den de manera natural una profusión tan espectacular de universos con constantes cosmológicas diferentes? [96]

De vicio a virtud

Los hay. Ya encontramos un marco semejante en el capítulo anterior. Un recuento de las diferentes formas posibles para las dimensiones extra en teoría de cuerdas, cuando se incluyen flujos que puedan atravesarlas, llega a unas 10^{500}. Esto deja pequeño a 10^{124}. Multipliquemos 10^{124} por algunos centenares de órdenes de magnitud y sigue siendo pequeño frente a 10^{500}. Restemos 10^{124} de 10^{500}, y luego restémoslo otra vez, y otra, y así sucesivamente mil millones de veces, y apenas hará mella. El resultado seguiría siendo prácticamente 10^{500}.

Un hecho crucial es que la constante cosmológica varía de uno de estos universos a otro. Igual que un flujo magnético lleva energía (puede mover cosas), también los flujos que atravie-

san agujeros en formas de Calabi-Yau tienen energía, cuya cantidad es muy sensible a los detalles geométricos de la forma. Si usted tiene dos formas de Calabi-Yau diferentes con flujos diferentes que atraviesan agujeros diferentes, sus energías también serán en general diferentes. Y puesto que una forma de Calabi-Yau dada está unida a cada punto en las tres grandes dimensiones familiares del espacio, como los lazos circulares de franela están unidos a cada punto de la gran base extendida de una alfombra, la energía que contiene la forma llenaría uniformemente las tres dimensiones grandes, igual que mojar las fibras individuales en la franela de una alfombra haría el cuerpo de la alfombra uniformemente pesado. Entonces, si una u otra de las 10^{500} diferentes formas de Calabi-Yau vestidas constituyera las dimensiones extra requeridas, la energía que contiene contribuiría a la constante cosmológica. Resultados obtenidos por Raphael Bousso y Joe Polchinski dieron un contenido cuantitativo a esta observación cuantitativa. Ellos argumentaron que las diversas constantes cosmológicas suministradas por las más o menos 10^{500} diferentes formas posibles están uniformemente distribuidas en un amplio rango de valores.

Esto es precisamente lo que el doctor recetaba. Tener 10^{500} marcas distribuidas a lo largo de un rango entre 0 y 1 asegura que muchas de ellas están extraordinariamente próximas al valor de la constante cosmológica que han medido los astrónomos durante la pasada década. Puede ser difícil encontrar los ejemplos explícitos entre las 10^{500} posibilidades, porque incluso si los computadores más rápidos de hoy necesitaran un solo segundo para analizar cada forma para las dimensiones extra, al cabo de mil millones de años sólo se habrían examinado unos raquíticos 10^{32} ejemplos. Pero este razonamiento sugiere con fuerza que existen.

Ciertamente, un conjunto de 10^{500} formas posibles para las dimensiones extra está tan lejos de un único universo como na-

die imaginaba que pudiera llevarnos alguna vez la investigación en teoría de cuerdas. Y para quienes han mantenido el sueño de Einstein de encontrar una teoría unificada que describa un único universo —el nuestro—, estos desarrollos producen un malestar significativo. Pero los análisis de la constante cosmológica ponen la situación a una luz diferente. Más que sentir desesperación porque no parece emerger un único universo, se nos anima a celebrarlo: la teoría de cuerdas hace que la parte menos plausible de la explicación de Weinberg de la constante cosmológica —el requisito de que haya muchos más de 10^{124} universos diferentes— parezca plausible de repente.

El paso final, en resumen

Parece que empiezan a juntarse los elementos de una historia seductora. Pero queda una laguna en el razonamiento. Una cosa es que la teoría de cuerdas permita un número enorme de posibles universos distintos, y otra es afirmar que la teoría de cuerdas asegura que todos los universos posibles a los que puede dar lugar existen realmente, como mundos paralelos que pueblan un inmenso multiverso. Fue Leonard Susskind —inspirado por el trabajo pionero de Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde y Sandip Trivedi— quien puso más énfasis al afirmar que si introducimos la inflación eterna en el tapiz, la laguna puede llenarse.[97]

Explicaré ahora este paso final, pero por si usted empieza a sentirse saturado y sólo quiere la conclusión, he aquí un resumen en pocas palabras. El multiverso inflacionario —el cosmos de gruyer en perpetua expansión— contiene un número enorme y en continuo aumento de universos burbuja. La idea

es que cuando se unen la cosmología inflacionaria y la teoría de cuerdas, el proceso de inflación eterna reparte las 10^{500} formas posibles de las dimensiones extra de la teoría de cuerdas a lo largo de las burbujas —una forma para las dimensiones extra por cada universo burbuja—, lo que proporciona un marco cosmológico que realiza todas las posibilidades. Según este razonamiento, vivimos en esa burbuja cuyas dimensiones extra dan un universo, con constante cosmológica y todo lo demás, que es favorable a nuestra forma de vida y cuyas propiedades coinciden con las observaciones.

En el resto del capítulo rellenaré los detalles, pero si usted está dispuesto a seguir, siéntase libre para saltar hasta la última sección del capítulo.

El paisaje de cuerdas

Al explicar la cosmología inflacionaria en el capítulo 3 utilicé una variación sobre una metáfora común. El pico de una montaña representa el valor más alto de la energía contenida en un campo inflatón que llena el espacio. El acto de rodar cuesta abajo por la montaña y llegar al reposo en un punto bajo en el terreno representa al inflatón liberando esta energía, que en el proceso se convierte en partículas de materia y radiación.

Repasemos tres aspectos de la metáfora, actualizándolos con ideas que hemos adquirido desde entonces. En primer lugar, hemos aprendido que el inflatón es sólo una fuente de la energía que puede llenar el espacio; otras contribuciones proceden de las fluctuaciones cuánticas de todos y cada uno de los campos —electromagnético, nuclear y demás—. Para revisar la metáfora en consecuencia, la altitud reflejará ahora la energía com-

binada, aportada por todas las fuentes, que llena uniformemente el espacio.

En segundo lugar, la metáfora original imaginaba que la base de la montaña, donde el inflatón llega finalmente al reposo, estaba al «nivel del mar», altitud 0, lo que significa que el inflatón ha cedido toda su energía (y presión). Pero con nuestra metáfora revisada, la base de la montaña debería representar la energía combinada que llena el espacio procedente de todas las fuentes una vez que la inflación ha terminado. Éste es otro nombre para constante cosmológica de dicho universo burbuja. Así, el misterio de explicar nuestra constante cosmológica se traduce en el misterio de explicar a qué altura está la base de nuestra montaña: ¿por qué está tan cerca, pero no exactamente, del nivel del mar?

Por último, inicialmente consideramos el más simple de los terrenos montañosos, un pico desde el que se desciende suavemente a una base, donde el inflatón se asentaría finalmente (véase Figura 3.1, p. 77). Luego fuimos un paso más lejos, teniendo en cuenta otros ingredientes (campos de Higgs) cuya evolución y lugares de reposo finales influirían en las características físicas manifiestas en los universos burbuja (véase Figura 3.6, p. 92). En la teoría de cuerdas el abanico de universos posibles es todavía más rico. La forma de las dimensiones extra determina las características físicas dentro de un universo burbuja dado; y por ello, los «lugares de reposo» posibles, los diversos valles en la Figura 3.6b, representan ahora las posibles formas que pueden tomar las dimensiones extra. Para acomodar las 10^{500} formas posibles para estas dimensiones, el terreno montañoso necesita un enorme surtido de valles, desfiladeros y cañones, tal como se representa en la Figura 6.4. Cualquiera de estos accidentes del terreno donde una bola podría llegar al reposo representa una forma posible en la que podrían relajarse las dimensiones extra; la altitud en dicho lugar representa la

constante cosmológica del correspondiente universo burbuja. La Figura 6.4 ilustra lo que se denomina el *paisaje de cuerdas*.

Con esta comprensión más refinada de la metáfora de la montaña —o paisaje— consideremos ahora cómo afectan los procesos cuánticos a la forma de las dimensiones extra en este escenario. Como veremos, la mecánica cuántica ilumina el paisaje.

Efecto túnel cuántico en el paisaje

Aunque la Figura 6.4 es necesariamente esquemática (cada uno de los diferentes campos de Higgs en la Figura 3.6 tiene su propio eje; análogamente, cada uno de los aproximadamente quinientos flujos de campo diferentes que pueden atravesar una forma de Calabi-Yau también debería tener su propio eje —pero esbozar montañas en un espacio 500-dimensional es impensable), sugiere correctamente que universos con diferentes formas para las dimensiones extra son partes de un terreno conexo.[98] Y cuando se tiene en cuenta la física cuántica, utilizando resultados descubiertos independientemente de la teoría de cuerdas por el legendario físico Sydney Coleman en colaboración con Frank De Luccia, las conexiones entre los universos admiten drásticas transmutaciones.

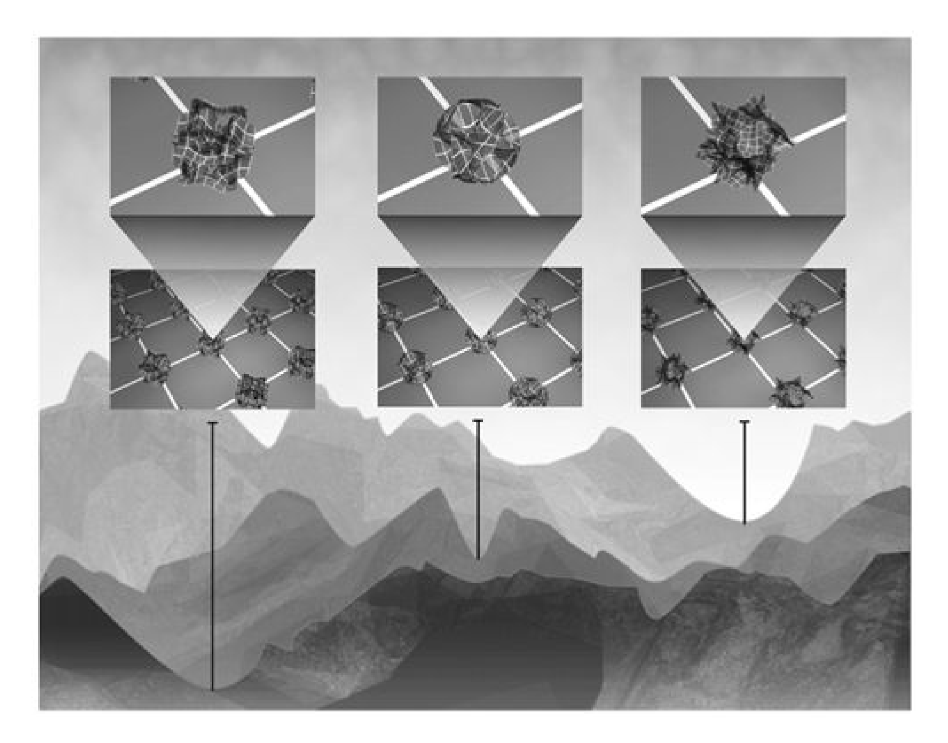


FIGURA 6.4. El paisaje de cuerdas puede visualizarse esquemáticamente como un terreno montañoso en el que diferentes valles representan diferentes formas para las dimensiones extra, y la altitud representa el valor de la constante cosmológica.

La física central se basa en un proceso conocido como *efecto túnel cuántico*. Imaginemos una partícula, por ejemplo un electrón, que choca contra una barrera sólida, digamos una pared de acero de tres metros de espesor. La física clásica predice que el electrón no puede penetrar la barrera. Sin embargo, una característica distintiva de la mecánica cuántica es que la rígida noción clásica de «no puede penetrar» se traduce a menudo en la declaración cuántica más blanda según la cual «tiene una probabilidad de penetración pequeña pero no nula». La razón es que las fluctuaciones cuánticas de una partícula le permiten, de vez en cuando, materializarse súbitamente en el otro lado de una barrera por lo demás impenetrable. El momento en el que sucede este efecto túnel cuántico es aleatorio; lo más que pode-

mos hacer es predecir la probabilidad de que tenga lugar durante un intervalo u otro. Pero las matemáticas dicen que si usted espera el tiempo suficiente, cualquier barrera será penetrada. Y lo es. Si no fuera así, el Sol no brillaría: para que los núcleos de hidrógeno se acerquen lo suficiente para fusionarse deben atravesar por efecto túnel la barrera creada por la repulsión electromagnética de sus protones.

Coleman y De Luccia, y muchos que han seguido su camino desde entonces, consideraron un efecto túnel cuántico en una escala ampliada desde la escala de partículas simples hasta la de un universo entero que se enfrenta a una similar barrera «impenetrable» que separa su configuración actual de otra configuración posible. Para hacerse una idea de su resultado, imagine dos universos posibles que son idénticos en todo salvo en un campo que llena uniformemente cada uno de ellos, cuya energía es mayor en uno y menor en el otro. En ausencia de una barrera, el valor mayor del campo de energía cae hasta el menor, como una bola que rueda cuesta abajo por una colina, como hemos visto en la discusión de la cosmología inflacionaria. Pero ¿qué sucede si la curva de energía del campo tiene una «protuberancia montañosa» que separa su valor actual del valor que busca, como en la Figura 6.5? Coleman y De Luccia encontraron que, igual que sucede en el caso de una simple partícula, un universo puede hacer lo que la física clásica prohíbe: puede fluctuar en su camino —puede experimentar efecto túnel cuántico— a través de la barrera y llegar a la configuración de energía más baja.

Pero puesto que estamos hablando de un universo y no sólo de una única partícula, el proceso de efecto túnel es más complicado. No se trata de que el valor del campo en todo el espacio atraviese simultáneamente la barrera, argumentaban Coleman y De Luccia; más bien, un suceso «semilla» de efecto túnel crearía una pequeña burbuja aleatoriamente localizada llena de la energía de campo más pequeña. Luego la burbuja crecería,

igual que el hielo-nueve de Vonnegut,[99] agrandando cada vez más el dominio en el que el campo había pasado por efecto túnel a la energía más baja.

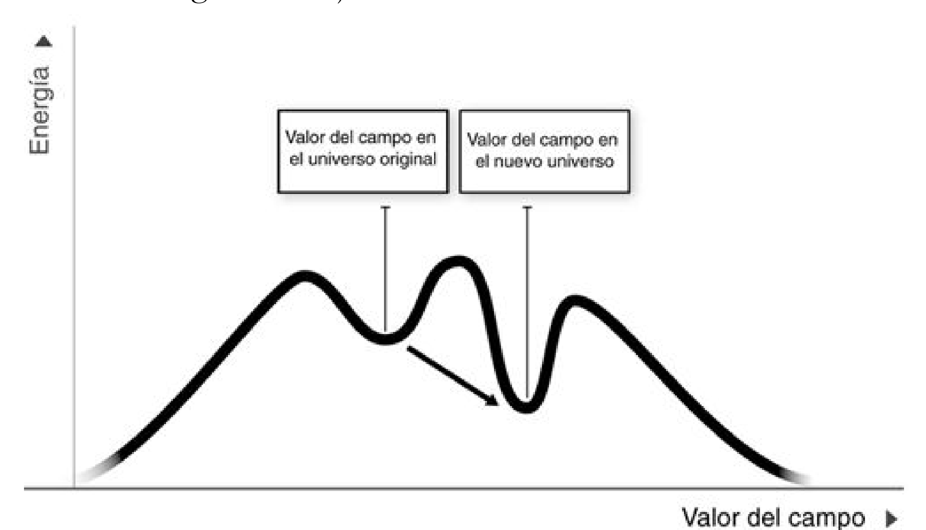


FIGURA 6.5. Un ejemplo de una curva de energía de campo que tiene dos valores —dos hondonadas o valles— donde el campo llega al reposo de forma natural. Un universo lleno del campo de mayor valor de la energía puede pasar por efecto túnel al valor más bajo. El proceso implica una pequeña región de espacio localizada aleatoriamente en el universo original que adquiere el valor inferior del campo; luego la región se expande, lo que transfiere un dominio cada vez más amplio desde la energía más alta hasta la más baja.

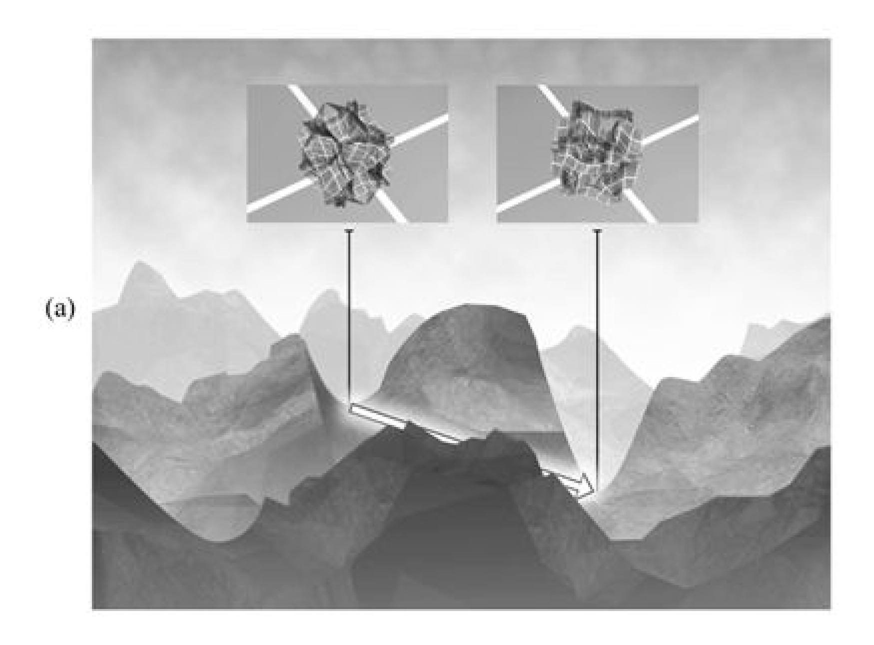
Estas ideas pueden aplicarse directamente al paisaje de cuerdas. Imagine que el universo tiene una forma particular para las dimensiones extra, que corresponde al valle izquierdo en la Figura 6.6a. Debido a la gran altitud de este valle, las tres familiares dimensiones espaciales están permeadas por una gran constante cosmológica —que da una fuerte gravedad repulsiva—, y por eso se están inflando rápidamente. Este universo en expansión, junto con sus dimensiones extra, se ilustra en el lado iz-

quierdo de la Figura 6.6b. Luego, en algún lugar y momento aleatorios, una minúscula región del espacio pasa por efecto túnel a través de la montaña interpuesta hasta el valle en el lado derecho de la Figura 6.6a. No es que la minúscula región del espacio se mueva (cualquier cosa que eso pudiera significar); más bien, la forma de las dimensiones extra (su forma, su tamaño y sus flujos que transporta) en esta pequeña región cambia. Las dimensiones extra en la minúscula región se transmutan, adquiriendo la forma asociada al valle derecho en la Figura 6.6a. Este nuevo universo burbuja está dentro del original, como se ilustra en la Figura 6.6b.

El nuevo universo se expandirá rápidamente y continuará transformando las dimensiones extra a medida que se dispersa. Pero puesto que la constante cosmológica del nuevo universo ha disminuido —su altitud en el paisaje es menor que la original—, la gravedad repulsiva que experimenta es más débil, y por ello no se expandirá tan rápidamente como el universo original. Tenemos así un universo burbuja en expansión, con la nueva forma para las dimensiones extra, contenido en un universo burbuja en expansión todavía más rápida, con la forma original para las dimensiones extra.[100]

El proceso puede repetirse. En otras localizaciones dentro del universo original tanto como dentro del nuevo, otros sucesos de efecto túnel hacen que se abran burbujas adicionales, lo que crea regiones con formas diferentes para las dimensiones extra (Figura 6.7). Con el tiempo, la extensión del espacio estará cribada con burbujas dentro de burbujas dentro de burbujas —cada una de las cuales experimenta expansión inflacionaria, cada una de ellas con una forma diferente para las dimensiones extra, y cada una de ellas con una constante cosmológica más pequeña que el universo burbuja más grande dentro del que se ha formado—.

El resultado es una versión más complicada del multiverso gruyer que hemos encontrado en nuestro anterior encuentro con la inflación eterna. En dicha versión, teníamos dos tipos de regiones: las regiones «con queso» que estaban sufriendo expansión inflacionaria y los «agujeros» que no lo hacían. Esto era un reflejo directo del paisaje simplificado con una única montaña cuya base suponíamos que estaba al nivel del mar. El paisaje más rico de la teoría de cuerdas, con sus diversos picos y valles correspondientes a diferentes valores de la constante cosmológica, da lugar a las muchas regiones diferentes en la Figura 6.7 —burbujas dentro de burbujas dentro de burbujas, como una secuencia de muñecas rusas, cada una de ellas pintada por un artista diferente—. En última instancia, la incesante serie de efectos túnel cuánticos a través del paisaje de cuerdas montañoso realiza toda posible forma para las dimensiones extra en un universo burbuja u otro. Éste es el *multiverso paisaje*.



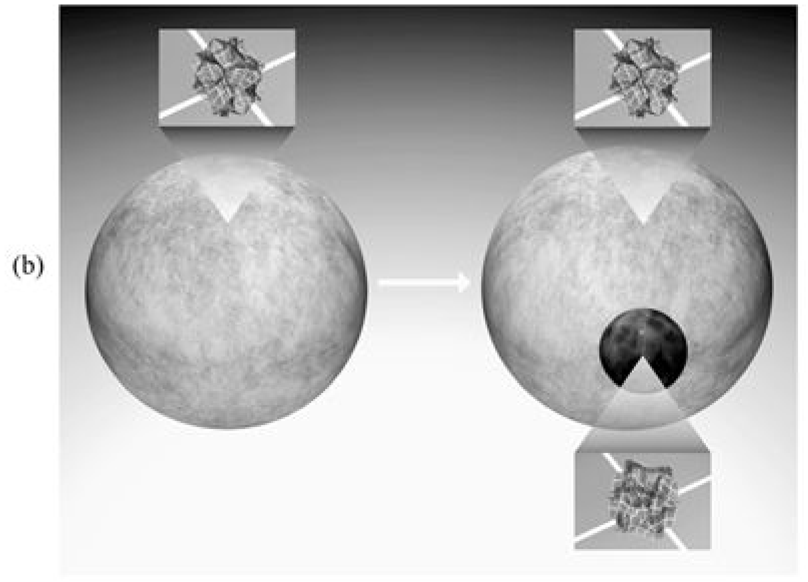


FIGURA 6.6. (a) Un suceso de efecto túnel cuántico, dentro del paisaje de cuerdas. (b) El efecto túnel crea una pequeña región de espacio —representada por la burbuja más pequeña y más oscura— dentro de la cual ha cambiado la forma de las dimensiones extra.

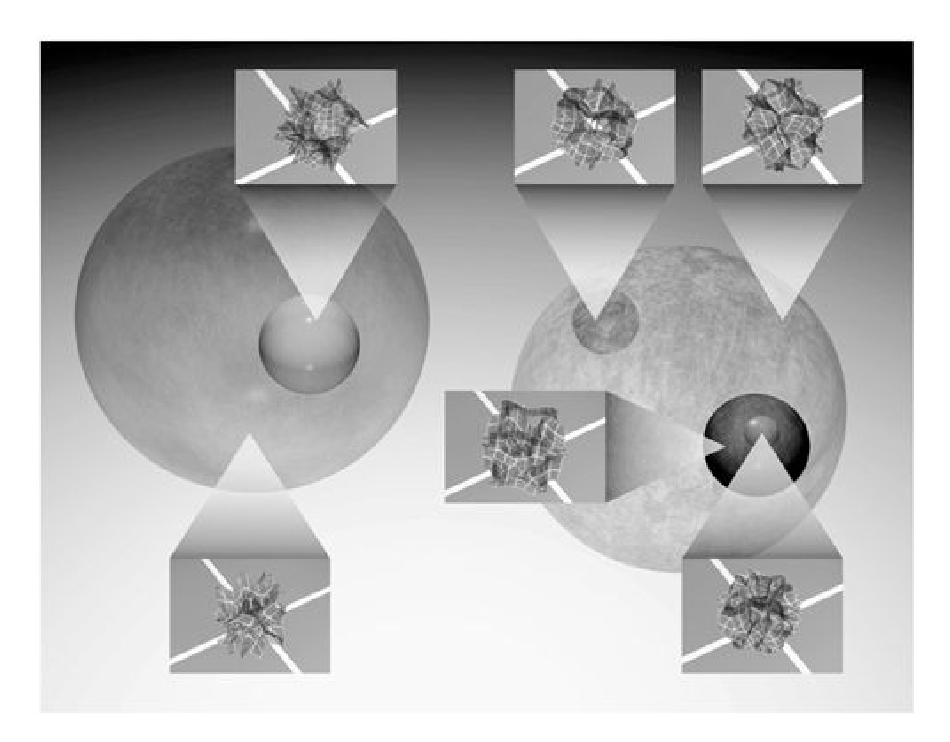


FIGURA 6.7. Una posible distribución de valores de la constante cosmológica a lo largo de un hipotético multiverso, que ilustra que distribuciones fuertemente sesgadas pueden hacer comprensibles observaciones de otro modo enigmáticas.

El multiverso paisaje es justo lo que necesitamos para la explicación de Weinberg de la constante cosmológica. Hemos argumentado que el paisaje de cuerdas asegura que hay, en teoría, formas *posibles* para las dimensiones extra que tendrían una constante cosmológica en el rango del valor observado: hay valles en el paisaje de cuerdas cuya minúscula altitud encaja con la minúscula pero no nula constante cosmológica que revelaron las observaciones de supernovas. Cuando el paisaje de cuerdas se combina con la inflación eterna, todas las formas posibles para las dimensiones extra, incluidas aquéllas con una constante cosmológica tan pequeña, cobran vida. En algún lugar dentro de la inmensa secuencia anidada de burbujas que constituye el multiverso paisaje, hay universos cuya constante cosmológica

es del orden de 10^{-123}, el minúsculo número que abría este capítulo. Y según esta línea de pensamiento, es una de estas burbujas en la que vivimos.

¿Y el resto de la física?

La constante cosmológica no es sino una característica del universo en que habitamos. Presumiblemente está entre las más enigmáticas, puesto que su pequeño valor medido está en notorio conflicto con los números que surgen de las estimaciones más directas utilizando la teoría establecida. Este cisma arroja una luz singular sobre la constante cosmológica y subyace en la urgencia de encontrar un marco, por exótico que sea, con la capacidad de explicarla. Los defensores del conjunto interconectado de las ideas expuestas argumentan que eso es precisamente lo que hace el multiverso de cuerdas.

Pero ¿qué pasa con todas las demás características de nuestro universo —la existencia de tres tipos de neutrinos, la masa concreta del electrón, la intensidad de la fuerza nuclear débil y todo lo demás? Aunque podemos imaginar el cálculo de estos números, nadie ha conseguido hacerlo todavía. Usted podría preguntarse si también sus valores están maduros para una explicación basada en un multiverso. De hecho, los investigadores que examinan el paisaje de cuerdas han encontrado que estos números, como la constante cosmológica, también varían de un lugar a otro, y con ello —al menos en nuestro conocimiento actual de la teoría de cuerdas— no están unívocamente determinados. Esto lleva a una perspectiva muy diferente de la que dominaba en los primeros días de investigación sobre el tema. Sugiere que, como sucede con tratar de explicar la distancia en-

tre la Tierra y el Sol, tratar de calcular las propiedades de las partículas fundamentales puede ser el camino equivocado. Como las distancias planetarias, algunas o todas de las propiedades variarían de un universo al siguiente.

Sin embargo, para que esta línea de pensamiento sea creíble necesitamos como mínimo saber no sólo que hay universos burbuja en los que la constante cosmológica tiene el valor correcto, sino también que en al menos una de tales burbujas las fuerzas y las partículas coinciden con lo que han medido los científicos en nuestro universo. Necesitamos estar seguros de que nuestro universo, con todos sus detalles, está en algún lugar en el paisaje. Éste es el objetivo de un campo floreciente llamado *construcción de modelos de cuerdas*. El programa de investigación equivale a ir de caza por el paisaje de cuerdas y examinar matemáticamente formas posibles para las dimensiones extra, en busca de universos que se parezcan mucho al nuestro. Es un reto formidable, puesto que el paisaje es demasiado grande y complicado como para ser estudiado por completo de una manera sistemática. El progreso requiere claras habilidades computacionales, así como intuición con respecto a qué piezas ensamblar —la forma de las dimensiones extra, su tamaño, los flujos de campo que rodean sus agujeros, la presencia de varias branas y demás—. Quienes dirigen esta partida combinan lo mejor de la ciencia rigurosa con una sensibilidad artística. Hasta la fecha, nadie ha encontrado un ejemplo que reproduzca exactamente las características de nuestro universo. Pero con 10^{500} posibilidades en espera de exploración, el consenso es que nuestro universo tiene un hogar en algún lugar en el paisaje.

¿Es esto ciencia?

En este capítulo hemos doblado una esquina lógica. Hasta ahora hemos estado explorando las implicaciones para la realidad, claras y obvias, de varios desarrollos en física fundamental e investigación en cosmología. Me encanta la posibilidad de que existan copias de la Tierra en los confines lejanos del espacio, o que nuestro universo sea una de las muchas burbujas en un cosmos en inflación, o que vivamos en una de las muchas mundobranas que constituyen una barra de pan cósmica gigante. No se puede negar que éstas sean ideas provocativas y atractivas.

Pero con el multiverso paisaje hemos invocado universos paralelos de una manera diferente. En la aproximación que acabamos de seguir, el multiverso paisaje no consiste meramente en ampliar nuestra visión de lo que podría existir. Más bien, un conjunto de universos paralelos, mundos que pueden estar más allá de nuestra capacidad de visitar o ver o comprobar o influir, ahora y quizá siempre, son invocados directamente para proporcionar ideas sobre las observaciones que hacemos aquí, en este universo.

Lo que plantea una pregunta esencial: ¿es esto ciencia?

7

La ciencia y el multiverso

Sobre inferencia, explicación y predicción

Cuando David Gross, correceptor del premio Nobel de Física de 2004, lanza invectivas contra el multiverso paisaje de la teoría de cuerdas, es muy probable que cite la alocución de Winston Churchill el 29 de octubre de 1941: «No hay que rendirse… Nunca, nunca, nunca, nunca —en nada, grande o pequeño, importante o trivial—, no hay que rendirse nunca». Cuando Paul Steinhardt, el profesor Albert Einstein de Ciencias en la Universidad de Princeton y codescubridor de la forma moderna de la cosmología inflacionaria, expresa su disgusto por el multiverso paisaje, las florituras retóricas son más contenidas, pero usted puede estar seguro de que en algún momento aparecerá una comparación, desfavorable, con la religión. Martin Rees, el astrónomo real del Reino Unido, ve el multiverso como el siguiente paso natural en nuestra comprensión profunda de todo lo que hay. Leonard Susskind dice que quienes ignoran la posibilidad de que seamos parte de un multiverso simplemente están apartando sus ojos de una visión que encuentran insoportable. Y éstos son sólo unos pocos ejemplos. Hay muchos más en uno u otro sentido, negadores vehementes y devotos entusiastas, y no siempre expresan sus opiniones en voz tan alta.

Durante el cuarto de siglo que he estado trabajando en teoría de cuerdas nunca he visto tanto apasionamiento, o un lenguaje tan cortante, como en las discusiones del paisaje de la teoría de

cuerdas y el multiverso a que pueden dar lugar. Y es evidente por qué. Muchos ven estos desarrollos como un campo de batalla para el alma misma de la ciencia.

El alma de la ciencia

Aunque el multiverso paisaje ha sido el catalizador, los argumentos giran sobre cuestiones centrales para cualquier teoría en la que aparece un multiverso. ¿Es científicamente justificable hablar de un multiverso, una aproximación que invoca dominios inaccesibles no sólo en la práctica sino, en muchos casos, incluso en teoría? ¿Es la noción de multiverso verificable o falsable? ¿Puede la invocación de un multiverso proporcionar un poder explicativo del que de lo contrario estaríamos privados?

Si la respuesta a estas preguntas es no, como afirman los detractores, entonces los defensores del multiverso están adoptado una posición inusual. Propuestas no verificables ni falsables, que invocan dominios ocultos inaccesibles para nosotros… parece que esto queda muy lejos de lo que a la mayoría de nosotros nos gustaría llamar ciencia. Y ahí está la chispa que enciende las pasiones. Los defensores contraatacan diciendo que aunque la manera en la que un multiverso dado conecta con las observaciones puede ser diferente de aquella a la que estamos acostumbrados en las propuestas respetables —puede ser más indirecta; puede ser menos explícita; puede requerir que brille una suerte favorable en experimentos futuros—, tales conexiones no están totalmente ausentes. Sin hacer apologías, esta línea argumental adopta una visión expansiva de lo que nuestras teorías y observaciones pueden revelar, y cómo pueden verificarse las ideas.

Cuál sea su postura respecto al multiverso depende también de su visión del mandato central de la ciencia. Los sumarios generales suelen resaltar que la ciencia trata de encontrar regularidades en el funcionamiento del universo, de explicar cómo las regularidades iluminan y reflejan leyes subyacentes de la naturaleza, y de poner a prueba las leyes propuestas haciendo predicciones que pueden ser verificadas o refutadas mediante más experimentos u observaciones. Por razonable que pueda ser la descripción, pasa por alto el hecho de que el proceso real de la ciencia es un negocio mucho más confuso, en el que plantear las preguntas correctas suele ser tan importante como encontrar y poner a prueba las respuestas propuestas. Y las preguntas no están flotando en un reino preexistente en el que el papel de la ciencia sea eliminarlas una a una. En su lugar, las preguntas de hoy suelen estar conformadas por las ideas de ayer. Los avances trascendentales responden algunas preguntas, pero luego dan lugar a muchas otras que previamente ni siquiera podían imaginarse. Al juzgar cualquier desarrollo, incluidas las teorías de multiverso, debemos tener en cuenta no sólo su capacidad para revelar verdades ocultas, sino también su impacto sobre las preguntas que nos vemos llevados a abordar. Es decir, el impacto sobre la propia práctica de la ciencia. Como se hará evidente, las teorías de multiversos tienen la capacidad de reformular algunas de las preguntas más profundas con las que han luchado los científicos durante décadas. Esa perspectiva anima a unos y enfurece a otros.

Habiendo fijado el escenario, reflexionemos ahora sistemáticamente sobre la legitimidad, la verificabilidad y la utilidad de marcos que imaginen que el nuestro sea uno de muchos universos.

Es difícil conseguir un consenso sobre estas cuestiones, en parte porque el concepto de multiverso no es monolítico. Ya hemos encontrado cinco versiones —mosaico, inflacionario, brana, cíclico y paisaje—, y en los capítulos que siguen encontraremos cuatro más. Es comprensible que la noción *genérica* de un multiverso tenga una reputación de estar más allá de la verificabilidad. Después de todo, dicen las valoraciones típicas, estamos considerando universos distintos del nuestro, pero puesto que sólo tenemos acceso a éste, también podríamos estar hablando de fantasmas o del ratoncito Pérez. De hecho, éste es el problema central con el que pronto nos veremos enfrentados, pero notemos primero que algunos multiversos sí permiten interacciones entre universos miembros. Hemos visto que en el multiverso brana, lazos de cuerda sueltos pueden viajar de una brana a otra. Y en el multiverso inflacionario, universos burbuja pueden encontrarse en contacto aún más directo.

Recordemos que el espacio entre dos universos burbuja en el multiverso inflacionario está permeado por un campo inflatón cuyas energía y presión negativa siguen siendo altas, y que por consiguiente experimenta expansión inflacionaria. Esta expansión separa los universos burbuja. Incluso así, si la velocidad a la que se expanden las propias burbujas supera a la velocidad a la que la dilatación del espacio las hace separarse, las burbujas colisionarán. Teniendo en cuenta que la expansión inflacionaria es acumulativa —cuanto más espacio que se dilata hay entre dos burbujas, más rápidamente se separan—, llegamos a un hecho interesante. Si se forman dos burbujas *realmente* próximas, habrá tan poco espacio interpuesto que la velocidad con que se separan será menor que la velocidad de expansión. Eso coloca a las burbujas en curso de colisión.

Este razonamiento está apoyado por las matemáticas. En el multiverso inflacionario, los universos pueden colisionar. Además, varios grupos de investigación (que incluyen a Jaume Garriga, Alan Guth y Alexander Vilenkin; Ben Freivogel, Matthew Kleban, Alberto Nicolis y Kris Sigurdson, así como Anthony Aguirre y Matthew Johnson) han establecido que mientras que algunas colisiones pueden perturbar violentamente la estructura interna de cada universo burbuja —lo que no es bueno para posibles moradores en burbujas como nosotros—, también pueden ocurrir alcances más suaves, que evitan consecuencias desastrosas pero siguen dando firmas observables. Los cálculos muestran que si tuviéramos un alcance con otro universo, el impacto desprendería ondas de choque en forma de rizos en el espacio, lo que generaría modificaciones en la pauta de regiones calientes y frías en la radiación de fondo de microondas.[101] Los investigadores están calculando ahora las huellas detalladas que dejaría tal perturbación, lo que establece la base para observaciones que algún día podrían proporcionar pruebas de que nuestro universo ha colisionado con otros —pruebas de que hay otros universos—.

Pero, por excitante que pueda ser la perspectiva, ¿qué pasa si ningún test en busca de pruebas de una interacción o un alcance con otro universo tiene éxito? Adoptando una perspectiva realista, ¿dónde queda el concepto de un multiverso si nunca encontramos firmas experimentales u observacionales de otros universos?

La ciencia y lo inaccesible I:
¿Puede ser científicamente justificable invocar universos inobservables?

Todo marco teórico viene con una supuesta arquitectura —los ingredientes fundamentales de la teoría y las leyes matemáticas que los gobiernan—. Aparte de definir la teoría, esta arquitectura establece también el tipo de preguntas que podemos plantear con la teoría. La arquitectura de Isaac Newton era tangible. Sus matemáticas trataban con las posiciones y las velocidades de objetos que directamente encontramos o podemos ver, desde piedras y bolas hasta la Luna y el Sol. Muchas observaciones confirmaron las predicciones de Newton, lo que nos da confianza en que sus matemáticas describían realmente cómo se mueven los objetos familiares. La arquitectura de James Clerk Maxwell introdujo un paso decisivo de abstracción. Los campos eléctrico y magnético vibrantes no son el tipo de cosas hacia el que nuestros sentidos han desarrollado una afinidad directa. Aunque vemos la «luz» —ondulaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda yacen en el rango que podemos detectar—, nuestras experiencias visuales no siguen directamente los campos ondulantes que postula la teoría. Incluso así, podemos construir equipos sofisticados que miden tales vibraciones y eso, junto con la abundancia de predicciones confirmadas de la teoría, constituye un poderoso argumento a favor de que estamos inmersos en un océano pulsante de campos electromagnéticos.

En el siglo XX, la ciencia fundamental pasó a descansar cada vez más en características inaccesibles. Espacio y tiempo, gracias a su unión, ofrecían el andamiaje para la relatividad especial. Cuando posteriormente se les dotó de la maleabilidad einsteniana, se convirtieron en el telón de fondo flexible de la teoría de la relatividad general. Ahora bien, yo he visto cómo marchan los relojes y he utilizado reglas para medir, pero nunca he agarrado el espacio-tiempo de la misma manera que agarro los brazos de mi sillón. Siento los efectos de la gravedad, pero si usted me insiste en si puedo afirmar directamente que estoy inmerso en un espacio-tiempo curvo, me encuentro de nuevo en la situación maxwelliana. Estoy convencido de que las teorías de la relatividad especial y general son correctas, no porque tenga un acceso tangible a sus ingredientes clave, sino más bien porque, cuando acepto sus marcos supuestos, las matemáticas hacen predicciones sobre cosas que puedo medir. Y las predicciones resultan ser extraordinariamente precisas.

La mecánica cuántica lleva aún más lejos esta inaccesibilidad. El ingrediente central de la mecánica cuántica es la onda de probabilidad, gobernada por una ecuación descubierta a mediados de los años veinte del siglo pasado por Erwin Schrödinger. Incluso si tales ondas son su característica distintiva, veremos en el capítulo 8 que la arquitectura de la física cuántica asegura que son permanente y completamente inobservables. Las ondas de probabilidad dan lugar a predicciones acerca de dónde es probable encontrar esta o esa partícula, pero las ondas propiamente dichas se escurren fue-

ra de la arena de la realidad cotidiana.[102] *Sin embargo, puesto que las predicciones son acertadas, generaciones de científicos han aceptado una situación tan singular: una teoría introduce una construcción radicalmente nueva y vital que, según la propia teoría, es inobservable.*

El tema común que recorre estos ejemplos es que el éxito de una teoría puede utilizarse como una justificación a posteriori de su arquitectura básica, incluso cuando la arquitectura permanece más allá de nuestra capacidad para acceder a ella directamente. Esto es una parte tan general de la experiencia diaria de los físicos teóricos que el lenguaje utilizado y las preguntas formuladas se refieren normalmente, sin la más mínima duda, a cosas que son, en el mejor de los casos, mucho menos accesibles que mesas y sillas, y algunas de las cuales se sitúan permanentemente fuera de los límites de la experiencia directa.[103]

Cuando vamos más lejos y utilizamos la arquitectura de una teoría para conocer los fenómenos que entraña, se presentan aún otros tipos de inaccesibilidad. Los agujeros negros surgen de las matemáticas de la relatividad general, y las observaciones astronómicas han proporcionado pruebas sustanciales de que son no sólo reales, sino abundantes. Incluso así, el interior de un agujero negro es un ambiente exótico. Según las ecuaciones de Einstein, el límite de un agujero negro, su horizonte de sucesos, es una superficie de no retorno. Usted puede entrar, pero no puede salir. Nosotros, los obligados moradores exteriores, nunca observaremos el interior de un agujero negro, no sólo debido a consideraciones prácticas, sino como una consecuencia de las propias leyes de la relatividad general. Pese a todo, hay pleno consenso en que la región al otro lado del horizonte de sucesos de un agujero negro es real.

La aplicación de la relatividad general a la cosmología ofrece ejemplos aún más extremos de inaccesibilidad. Si a usted no le importa hacer un viaje solo de ida, el interior de un agujero negro es cuando menos un destino posible. Pero los dominios que están más allá de nuestro horizonte cósmico son inalcanzables, incluso si fuéramos capaces de viajar a casi la velocidad de la luz. En un universo en aceleración como el nuestro, este punto se hace obligadamente evidente. Dado el valor medido de la aceleración cosmológica (y suponiendo que nunca cambiará), cualquier objeto que esté a más de unos veinte mil millones de años luz estará permanentemente fuera de lo que podemos ver, visitar, medir o influir. Más allá de esta distancia, el espacio siempre se estará alejando de nosotros tan rápidamente que cualquier intento de reducir la separación sería tan infructuoso como el de un remero en una barca que navega contra una corriente que fluye a más velocidad que la que él puede remar.

Los objetos que han estado siempre más allá de nuestro horizonte cósmico son objetos que nunca hemos observado y nunca observaremos; recíprocamente, ellos nunca nos han observado, y nunca lo harán. Los objetos que en algún momento en el pasado estuvieron dentro de nuestro horizonte cósmico pero han sido arrastrados más allá de él por la expansión del espacio son objetos que una vez pudimos ver pero nunca más veremos. Pese a todo, creo que podemos estar de acuerdo en que tales objetos son tan reales como cualquier cosa tangible, y así lo son también los dominios en los que habitan. Ciertamente sería peculiar argumentar que una galaxia que una vez pudimos ver pero que desde entonces ha salido de nuestro horizonte cósmico ha entrado en un dominio no existente, un dominio que debido a su permanente inaccesibilidad necesita ser borrado del mapa de la realidad. Incluso si no podemos observar o influir en tales dominios, ni ellos en nosotros, están incluidos adecuadamente en nuestra imagen de lo que existe.[104]

Estos ejemplos dejan claro que la ciencia no es ajena a teorías que incluyen elementos, desde ingredientes básicos hasta consecuencias derivadas, que son inaccesibles. Nuestra confianza en tales intangibles se basa en nuestra confianza en la teoría. Cuando la mecánica cuántica invoca ondas de probabilidad, su impresionante capacidad para describir las cosas que podemos medir, tales como el comportamiento de átomos y partículas subatómicas, nos obliga a aceptar la realidad etérea que postula. Cuando la relatividad general predice la existencia de lugares que no podemos observar, sus magníficos éxitos en la descripción de cosas que podemos observar, tales como el movimiento de planetas y la trayectoria de la luz, nos obligan a tomar en serio las predicciones.

De modo que para que crezca la confianza en una teoría no exigimos que todas sus características sean verificables; un surtido variado y sólido de predicciones confirmadas es suficiente. Trabajo científico que se remonta a más de una década ha aceptado que una teoría puede invocar elementos ocultos e inaccesibles —siempre que también haga nuevas, interesantes y verificables predicciones sobre una abundancia de fenómenos observables—.

Esto sugiere que es posible construir un argumento convincente a favor de una teoría que incluye un multiverso incluso si no podemos tener pruebas directas de universos más allá del nuestro. Si la evidencia experimental y observacional que apoya una teoría le obliga a aceptarla, y si la teoría se basa en una estructura matemática tan rígida que no hay lugar para elegir unas características y descartar otras, entonces usted tiene que aceptarla por entero. Y si la teoría implica la existencia de otros universos, entonces ésa es la realidad que la teoría exige que usted asuma.

En principio, entonces —y no nos engañemos, ésta es una cuestión de principios— la mera invocación de universos inaccesibles no relega una propuesta a quedar fuera de la ciencia. Para ampliar esto, imagine que un día construimos un argumento experimental y observacional convincente a favor de la teoría de cuerdas. Quizá un acelerador futuro sea capaz de detectar secuencias de pautas vibracionales y pruebas de dimensiones extra, mientras las observaciones astronómicas detectan aspectos de cuerdas en la radiación de fondo de microondas, así como las firmas de cuerdas muy estiradas que ondulan a través del espacio. Supongamos además que nuestro conocimiento de la teoría de cuerdas ha avanzado sustancialmente, y hemos aprendido que la teoría genera absoluta, positiva e incontrovertiblemente el multiverso paisaje. Por muchas llamadas a lo contrario, una teoría con fuerte apoyo experimental y observacional, cuya estructura interna requiere un multiverso, nos llevaría a concluir inexorablemente que ha llegado el tiempo de «rendirse».[105]

De modo que para abordar la pregunta que encabeza esta sección, invocar un multiverso en el contexto científico correcto no sería algo meramente respetable; dejar de hacerlo pondría de manifiesto un prejuicio no científico.

La ciencia y lo inaccesible II:

Hasta aquí los principios; ¿dónde estamos en la práctica?

El escéptico responderá correctamente que una cosa es hacer una observación de principios acerca de cómo podría presentarse el argumento a favor de una teoría del multiverso dada, y otra cosa es evaluar si algunas de las propuestas de multiverso que hemos descrito se pueden calificar como teorías experimentalmente confirmadas que vienen equipadas con una predicción absoluta de otros diversos. ¿Lo hacen?

El multiverso mosaico surge de una extensión espacial infinita, una posibilidad que encaja perfectamente en la relatividad general. La pega es que la relatividad general permite una extensión espacial infinita pero no la exige, lo que a su vez explica por qué, incluso si la relatividad general es un marco aceptado, el multiverso mosaico sigue siendo tentativo. Una extensión espacial infinita surge directamente de la inflación eterna —recordemos que cada universo burbuja visto desde el in-

terior aparece infinitamente grande—, pero en este escenario el multiverso mosaico se hace incierto porque la propuesta subyacente, la inflación eterna, sigue siendo hipotética.

La misma consideración afecta al multiverso inflacionario, que también surge de la inflación eterna. Las observaciones astronómicas durante la pasada década han reforzado la confianza de la comunidad de la física en la cosmología inflacionaria, pero no dicen nada sobre si la expansión inflacionaria es eterna. Los estudios teóricos muestran que aunque muchas versiones son eternas, lo que da un universo burbuja tras otro, otras implican simplemente una única extensión espacial que se infla.

Los multiversos brana, cíclico y paisaje se basan en la teoría de cuerdas, de modo que adolecen de múltiples incertidumbres. Por extraordinaria que pueda ser la teoría de cuerdas, por rica que haya llegado a ser su estructura matemática, la ausencia de predicciones verificables, y la consiguiente ausencia de contacto con observaciones o experimentos, la relega al reino de la especulación científica. Además, cuando sigue habiendo mucho por hacer en la teoría, no está claro qué aspectos seguirán desempeñando un papel fundamental en los refinamientos futuros. ¿Seguirán siendo centrales las branas, la base de los multiversos brana y cíclico? ¿Seguirá habiendo abundantes elecciones para las dimensiones extra, la base del multiverso paisaje, o finalmente se encontrará un principio matemático que seleccione una forma particular? Sencillamente no lo sabemos.

Así pues, aunque es concebible que pudiéramos construir un argumento convincente a favor de una teoría del multiverso que hiciera pocas o ninguna referencia a su predicción de otros universos, esta aproximación no funcionará para los escenarios multiverso que hemos encontrado. Al menos no todavía. Para valorar cualquiera de ellas, necesitaremos tratar directamente su predicción de un multiverso.

¿Podemos hacerlo? ¿Puede la invocación de otros universos por parte de una teoría dar predicciones verificables incluso si tales universos están fuera del alcance de los experimentos y las observaciones? Abordaremos esta pregunta clave en varios pasos. Seguiremos la pauta anterior, avanzando desde una perspectiva «en teoría» hasta una perspectiva «en la práctica».

Predicciones en un multiverso I:

Si los universos que constituyen un multiverso son inaccesibles, ¿pueden contribuir significativamente a hacer predicciones?

Algunos científicos que se resisten a teorías de multiversos ven la empresa como la admisión de un fracaso, una completa renuncia al largo tiempo buscado objetivo de comprender por qué el universo que vemos tiene las propiedades que tiene. Yo me identifico con esto, pues soy uno de los muchos que han trabajado durante décadas para realizar la seductora promesa de la teoría de calcular toda característica observable fundamental del universo, incluidos los valores de las constantes de la naturaleza. Si aceptamos que somos parte de un multiverso en el que algunas o quizá todas las constantes varían de un universo a otro, entonces aceptamos que este objetivo está equivocado. Si las leyes fundamentales permiten, digamos, que la intensidad de la fuerza electromagnética tenga muchos valores diferentes a lo largo del multiverso, entonces la noción misma de calcular la intensidad carece de significado, como lo haría pedir a un pianista que escoja la nota.

Pero la pregunta es: ¿significa la variación en las características que perdemos todo poder de predecir (o posdecir) las que son intrínsecas a nuestro universo? No necesariamente. Incluso si un multiverso impide la unicidad, es posible que pueda retenerse cierto grado de capacidad predictiva. Es una cuestión de estadística.

Tomemos los perros como ejemplo. No todos pesan lo mismo. Hay perros muy ligeros, tales como los chihuahuas, que pueden pesar menos de un kilogramo; hay perros muy pesados, tales como los mastines, que pueden llegar a los cien kilogramos. Si yo le retara a que predijera el peso del próximo perro que encuentre en la calle, podría parecer que lo mejor que usted puede hacer es elegir un número aleatorio dentro del rango que acabo de dar. Pero con algo de información, puede hacer una conjetura más refinada. Si usted sabe algo de los datos de la población canina en su vecindad, tal como el número de personas que tienen perros de una u otra raza, la distribución de pesos dentro de cada raza, y quizá incluso información del número de veces al día que es preciso sacar de paseo a cada raza, puede imaginar el peso del perro con el que tiene más probabilidades de cruzarse.

Ésta no sería una predicción muy precisa; las ideas estadísticas no lo son. Pero dependiendo de la distribución de perros, quizá sea usted capaz de hacer algo mucho mejor que sólo sacar un número de un sombrero. Si en su vecindad hay una distribución muy sesgada, en la que un 80 por 100 de los perros son labradores cuyo peso medio es de treinta kilogramos, y el 20 por 100 restante se

compone de un abanico de razas, desde Scottish terrier hasta caniches, cuyo peso medio es de quince kilogramos, entonces algo en el rango de veinticinco a treinta kilogramos sería una buena apuesta. El próximo perro que usted encuentre puede ser un Shih-tzu chino, pero hay gran probabilidad de que no lo sea. Para distribuciones todavía más sesgadas, sus predicciones pueden ser más precisas. Si el 95 por 100 de los perros en su zona son labradores de treinta kilogramos, entonces usted tendría una base firme para predecir que el próximo perro que encuentre será uno de éstos.

Un enfoque estadístico similar puede aplicarse a un multiverso. Imaginemos que estamos investigando una teoría de multiverso que admite un amplio rango de universos diferentes —diferentes valores para las intensidades de las fuerzas, las propiedades de las partículas, los valores de la constante cosmológica, etcétera—. Imaginemos además que el proceso cosmológico mediante el que se forman estos universos (tales como la creación de universos burbuja en el multiverso paisaje) está suficientemente bien entendido para que podamos determinar la distribución de universos, con diversas propiedades, a través del multiverso. Esta información tiene la virtud de dar ideas importantes.

Para ilustrar las posibilidades, supongamos que nuestros cálculos dan una distribución particularmente simple: algunas características físicas varían ampliamente de un universo a otro, pero otras son invariables. Por ejemplo, imaginemos que las matemáticas revelan que hay una colección de partículas, comunes a todos los universos en el multiverso, cuyas masas y cargas tienen los mismos valores en cada universo. Una distribución como ésta genera predicciones absolutamente firmes. Si los experimentos emprendidos en nuestro único universo solitario no encuentran la colección de partículas predicha, tendríamos que descartar la teoría, con multiverso y todo lo demás. El conocimiento de la distribución hace así falsable esta propuesta de multiverso. Recíprocamente, si nuestros experimentos encontraran las partículas predichas, ello aumentaría nuestra confianza en que la teoría es correcta.[106]

Como ejemplo adicional, imaginemos un multiverso en el que la constante cosmológica varía en un enorme rango de valores, pero lo hace de una manera muy poco uniforme, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 7.1. La gráfica denota la fracción de universos dentro del multiverso (eje vertical) que tienen un valor dado de la constante cosmológica (eje horizontal). Si fuéramos parte de tal multiverso, el misterio de la constante cosmológica tomaría un carácter decididamente diferente. La mayoría de los universos en este escenario tiene una constante cosmológica próxima a la que hemos medido en nuestro universo, de modo que aunque el rango de valores posibles sería enorme, la distribución sesgada implica que el valor que hemos observado no es nada especial. En un multiver-

so así, usted no debería estar más perplejo por el hecho de que nuestro universo tenga una constante cosmológica de valor 10^{-123} que sorprendido por encontrar un perro labrador de treinta kilogramos durante su próximo paseo por su vecindad. Dadas las distribuciones relevantes, cada una de esas cosas es lo más probable que podría suceder.

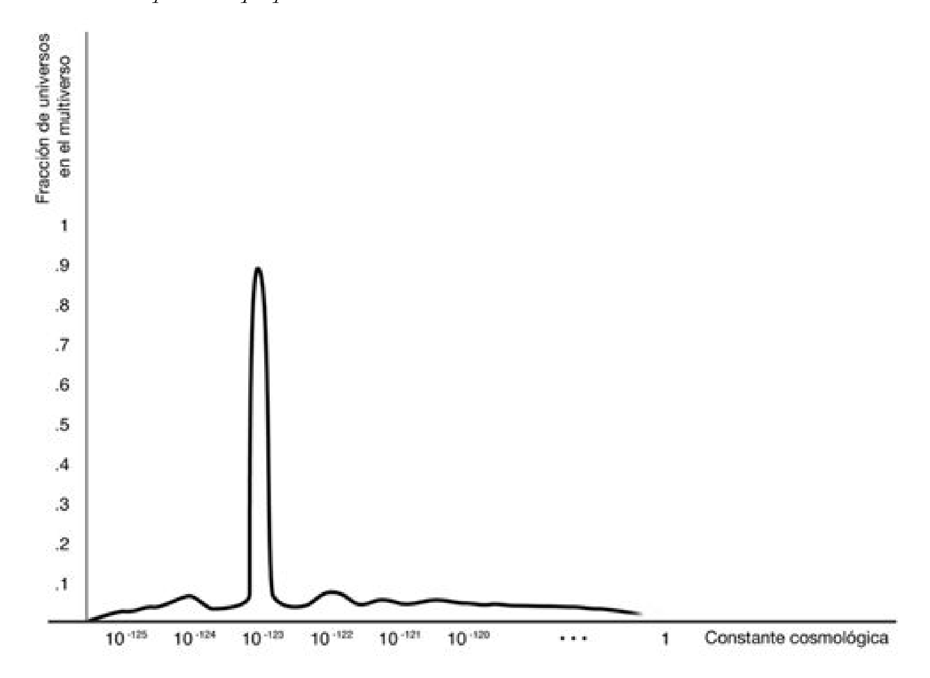


Figura 7.1. Una posible distribución de valores de la constante cosmológica a lo largo de un hipotético multiverso, que ilustra que distribuciones fuertemente sesgadas pueden hacer comprensibles observaciones de otro modo enigmáticas.

He aquí una variante del tema. Imaginemos que, en una propuesta de multiverso dada, el valor de la constante cosmológica varía mucho, pero, a diferencia del ejemplo anterior, varía uniformemente; el número de universos que tienen un valor dado es comparable al número de universos que tienen cualquier otro valor de la constante cosmológica. Pero imaginemos además que un detallado estudio matemático de la teoría del multiverso propuesta revela una característica inesperada en la distribución. Para aquellos universos en los que la constante cosmológica está en el rango que hemos observado, las matemáticas

muestran que siempre hay un tipo de partícula cuya masa es, digamos, mil veces la del protón —demasiado pesada para haber sido observada en los aceleradores construidos en el siglo XX, pero perfectamente dentro del alcance de los construidos en el siglo XXI—. Debido a la estrecha correlación entre estas dos características físicas, esta teoría del multiverso es también falsable. Si no conseguimos encontrar el tipo de partícula pesada predicho, refutaríamos este multiverso propuesto; por el contrario, el descubrimiento de la partícula reforzaría nuestra confianza en que la propuesta es correcta.

Déjeme subrayar que estos escenarios son hipotéticos. Los invoco porque ilustran un posible perfil para la intuición y verificación científicas en el contexto de un multiverso. Antes sugerí que si una teoría del multiverso da lugar a características verificables además de la predicción de otros universos, es posible —en teoría— construir un argumento en su apoyo incluso si los otros universos son inaccesibles. Los ejemplos que acabamos de dar hacen explícita estas sugerencias. Para este tipo de propuestas de multiverso, la respuesta a la pregunta que encabeza esta sección sería inequívocamente sí.

La característica esencial de tales «multiversos predictivos» es que no son un cajón de sastre de universos constituyentes. Más bien, la capacidad de hacer predicciones se debe a que el universo manifiesta una pauta matemática subyacente: las propiedades físicas están distribuidas a lo largo de los universos constituyentes de una manera fuertemente sesgada o altamente correlacionada.

¿Cómo podría darse esto? Y, dejando las cuestiones de «principios», ¿se da en las teorías de multiverso que hemos encontrado?

Predicciones en un multiverso II:
Hasta aquí la teoría; ¿dónde estamos en la práctica?

La distribución de perros en una zona dada depende de un abanico de influencias, entre ellas factores culturales y financieros y la pura casualidad. Debido a esta complejidad, si usted fuera a hacer predicciones estadísticas, lo mejor sería que evitara las consideraciones de cómo llega a darse una distribución de perros dada y utilizara simplemente los datos relevantes de la administración local que da las licencias caninas. Por desgracia, los escenarios multiverso no tienen oficinas de censo comparables, de modo que la opción análoga no está disponible. Nos vemos obligados a basarnos en nuestra comprensión teórica de cómo podría aparecer un multiverso dado para determinar la distribución de los universos que contendría.

El multiverso paisaje, al estar basado en la inflación eterna y la teoría de cuerdas, ofrece un buen caso de estudio. En este escenario, los motores gemelos que impulsan la producción de nuevos universos son la expansión inflacionaria y el efecto túnel cuántico. Recordemos cómo funciona: un universo que se infla, correspondiente a uno u otro valle en el paisaje de cuerdas, atraviesa por efecto túnel una de las montañas circundantes y se asienta en otro valle. El primer universo —con características definidas tales como las intensidades de las fuerzas, propiedades de las partículas, valor de la constante cosmológica y demás— se hace con una burbuja en expansión del nuevo universo (véase Figura 6.7), con un nuevo conjunto de características físicas, y el proceso continúa.

Ahora bien, siendo un proceso cuántico, tales sucesos de efecto túnel tienen un carácter probabilístico. No se puede predecir cuándo y dónde sucederán. Pero se puede predecir la probabilidad de que un suceso de efecto túnel suceda en un intervalo dado de tiempo y vaya en una dirección dada —probabilidades que dependen de características detalladas del paisaje de cuerdas, tales como la altitud de los diversos picos montañosos y valles (es decir, el valor de sus respectivas constantes cosmológicas)—. Los sucesos de efecto túnel más probables se darán más a menudo, y la distribución de universos resultante lo reflejará. La estrategia, entonces, es utilizar las matemáticas de la cosmología inflacionaria y la teoría de cuerdas para calcular la distribución de universos, con diversas características físicas, a lo largo del multiverso paisaje.

El problema es que hasta ahora nadie ha sido capaz de hacerlo. Nuestro conocimiento actual sugiere un exuberante paisaje de cuerdas con un número enorme de montañas y valles, lo que convierte en un desafío matemático terriblemente difícil calcular los detalles del multiverso resultante. El

trabajo pionero de cosmólogos y teóricos de cuerdas ha contribuido significativamente a nuestro conocimiento, pero las investigaciones se encuentran todavía en un estado rudimentario.[107]

Para ir más allá, los defensores del multiverso proponen introducir en esta mezcla otro elemento importante. Una consideración de los efectos de selección introducida en el capítulo anterior: razonamiento antrópico.

Predicciones en un multiverso III:

Razonamiento antrópico

Muchos de los universos en un multiverso dado están condenados a no contener vida. La razón, como hemos visto, es que cambios en los parámetros fundamentales de la naturaleza respecto a sus valores conocidos suelen destruir las condiciones favorables para que surja la vida.[108] *Nuestra misma existencia implica que nunca podríamos encontrarnos en ninguno de estos dominios sin vida, y el hecho de que no veamos su combinación de propiedades concreta no necesita más explicación. Si una propuesta de multiverso dada implicara un único universo que soporta vida, habríamos tenido premio. Calcularíamos matemáticamente las propiedades de tal universo especial; si difirieran de lo que hemos medido en nuestro propio universo, podríamos descartar la propuesta de multiverso. Si las propiedades coincidieran con las nuestras, tendríamos una impresionante vindicación de la teorización del multiverso antrópico —y razones para ampliar enormemente nuestra imagen de la realidad—.*

En el caso más plausible de que no haya un único universo que soporta la vida, varios teóricos (entre los que se incluyen Steven Weinberg, Andrei Linde, Alex Vilenkin, George Efstathiou y muchos otros) han defendido una aproximación estadística ampliada. En lugar de calcular la preponderancia relativa, dentro del multiverso, de diversos tipos de universos, proponen que calculemos el número de habitantes —los físicos normalmente les llaman observadores— que se encontrarían en diversos tipos de universos. En algunos universos, las condiciones serían apenas compatibles con la vida, de modo que los observadores serían raros, como los cactus ocasionales en un árido desierto; otros universos, con condiciones más favorables, estarían repletos de observadores. La idea es que, de la misma forma que los datos del censo canino nos dejan predecir qué tipo de perros podemos encon-

trar, también los datos del censo de observadores nos dejan predecir las propiedades que esperaríamos ver —usted y yo, según el razonamiento de esta aproximación— en un típico habitante que viviera en algún lugar del multiverso.

Un ejemplo concreto fue elaborado en 1997 por Weinberg y sus colaboradores Hugo Martel y Paul Shapiro. Para un multiverso en que la constante cosmológica varíe de un universo a otro, calcularon cuán abundante sería la vida en cada uno de ellos. Esta difícil tarea se hizo factible invocando la cifra estimada de Weinberg (capítulo 6): en lugar de vida propiamente dicha, consideraron la formación de galaxias. Más galaxias significan más sistemas planetarios y con ello, dice la hipótesis subyacente, una mayor probabilidad de vida, y vida inteligente en particular. Ahora bien, como Weinberg había encontrado en 1987, incluso una modesta constante cosmológica genera gravedad repulsiva suficiente para impedir la formación de galaxias, de modo que sólo hay que considerar dominios del multiverso que tengan constantes cosmológicas suficientemente pequeñas. Una constate cosmológica que es negativa da como resultado un universo que colapsa mucho antes de que se formen galaxias, de modo que estos dominios del multiverso también pueden omitirse en el análisis. Así pues, el razonamiento antrópico centra nuestra atención en la porción del multiverso en la que la constante cosmológica se encuentra en una ventana estrecha; como se discutió en el capítulo 6, los cálculos muestran que para que un universo dado contenga galaxias, su constante cosmológica tiene que ser menor que unas doscientas veces la densidad crítica (una masa equivalente del orden de 10^{-27} gramos en cada centímetro cúbico de espacio, o del orden de 10^{-121} en unidades de Planck). [109]

Para universos cuya constante cosmológica está en este rango, Weinberg, Martel y Shapiro emprendieron un cálculo más refinado. Determinaron la fracción de materia en cada uno de tales universos que se acumularía en el curso de la evolución cosmológica, un paso fundamental en el camino a la formación de galaxias. Encontraron que si la constante cosmológica está muy cerca del límite superior de la ventana, se formarían relativamente pocos grumos, puesto que el empujón hacia fuera de la constante cosmológica actúa como un ventarrón que barre casi todas las acumulaciones de polvo. Asimismo, encontraron que si el valor de la constante cosmológica está cerca del límite inferior de la ventana, cero, se forman muchos grumos, puesto

que se minimiza la influencia perturbadora de la constante cosmológica. Lo que significa que hay una gran probabilidad de que usted esté en un universo cuya constante cosmológica esté cerca de cero, puesto que tales universos tienen abundancia de galaxias y, por el razonamiento de esta aproximación, de vida. Hay una pequeña probabilidad de que usted esté en un universo cuya constante cosmológica esté cerca del límite superior de la ventana, aproximadamente 10^{-121}, porque tales universos contienen muchas menos galaxias. Y hay una modesta probabilidad de que esté en un universo cuya constante cosmológica esté en un valor entre estos extremos.

Utilizando la versión cuantitativa de estos resultados, Weinberg y sus colaboradores calcularon el análogo cósmico a encontrar un perro labrador de treinta kilogramos en un paseo medio por la vecindad —es decir, el valor de la constante cosmológica del que sería testigo un observador promedio en el multiverso—. ¿La respuesta? Algo mayor de lo que revelaron las medidas de supernovas posteriores, pero decididamente en el mismo rango. Encontraron que aproximadamente entre 1 de cada 10 y 1 de cada 20 habitantes del multiverso tendrían una experiencia comparable a la nuestra, al medir que el valor de la constante cosmológica en su universo es del orden de 10^{-123}.

Aunque un porcentaje superior sería más satisfactorio, el resultado es en cualquier caso impresionante. Antes de este cálculo, la física se enfrentaba a un desajuste entre teoría y observación de más de ciento veinte órdenes de magnitud, lo que sugería con fuerza que algo en nuestro conocimiento estaba profundamente equivocado. Sin embargo, la aproximación del multiverso de Weinberg y sus colaboradores mostraba que encontrarse en un universo cuya constante cosmológica es similar al valor que hemos medido es, más o menos, tan sorprendente como tropezar con un Shih-tzu chino en una vecindad dominada por perros labradores. Es decir, no muy sorprendente. Cier-

tamente, visto desde esta perspectiva del multiverso, el valor observado de la constante cosmológica no sugiere una profunda carencia de conocimiento, y eso es un paso adelante estimulante.

No obstante, análisis posteriores resaltaron una faceta interesante que algunos interpretan como una debilitación del resultado. Por simplicidad, Weinberg y sus colaboradores imaginaron que a lo largo de su multiverso sólo el valor de la constante cosmológica variaba de un universo a otro; otros parámetros físicos se suponían fijos. Max Tegmark y Martin Rees advirtieron que si se suponía que tanto el valor de la constante cosmológica como, digamos, el tamaño de las fluctuaciones cuánticas en el universo primitivo variaban de un universo a otro, la conclusión cambiaría. Recordemos que las fluctuaciones son las semillas primordiales de la formación de galaxias: minúsculas fluctuaciones cuánticas, estiradas por la expansión inflacionaria, dan un surtido aleatorio de regiones en donde la densidad de materia es un poco más alta o un poco más baja que la media. Las regiones de densidad más alta ejercen una mayor atracción gravitatoria sobre la materia vecina, y por ello se hacen aún más grandes, hasta formar finalmente galaxias. Tegmark y Rees señalaron que igual que las montones de hojas más grandes pueden soportar mejor una fuerte brisa, también semillas primordiales más grandes pueden soportar mejor el perturbador empujón hacia fuera de la constante cosmológica. Un multiverso en el que varían tanto el tamaño de la semilla como el valor de la constante cosmológica contendría universos donde constantes cosmológicas más grandes estarían compensadas con semillas mayores; esa combinación sería compatible con la formación de galaxias —y, con ello, con la vida—. Un multiverso de este tipo aumenta el valor de la constante cosmológica que vería un observador típico, y con ello da como resultado una disminución —potencialmente una disminución brusca— de la

fracción de observadores que encontrarían que sus constantes cosmológicas tienen un valor tan pequeño como el que hemos medido.

A los fervientes defensores del multiverso les gusta señalar el análisis de Weinberg y sus colaboradores como un éxito del razonamiento antrópico. A los detractores les gusta señalar que las cuestiones planteadas por Tegmark y Rees hacen el resultado antrópico menos convincente. En realidad, el debate es prematuro. Ésos son cálculos iniciales, básicamente exploratorios, y es mejor verlos como algo que proporciona ideas en el dominio general del razonamiento antrópico. Bajo ciertas hipótesis restrictivas, muestran que el marco antrópico puede llevarnos dentro del orden de magnitud de la constante cosmológica medida; relajemos algo dichas hipótesis, y los cálculos muestran que el orden de magnitud crece sustancialmente. Esta sensibilidad implica que un cálculo de multiverso refinado requerirá un conocimiento preciso de las propiedades detalladas que caracterizan a los universos constituyentes, y de cómo varían, lo que reemplazará las hipótesis arbitrarias por directrices teóricas. Esto es esencial para que un multiverso tenga alguna probabilidad de dar conclusiones definitivas.

Los investigadores se están esforzando en conseguir este objetivo, pero, hoy por hoy, todavía no lo han alcanzado.[110]

Predicción en un multiverso IV: *¿Qué saldrá?*

Entonces, ¿qué obstáculos tendremos que salvar antes de que podamos extraer predicciones de un multiverso dado? Hay tres que destacan especialmente.

Primero, como ilustraba oportunamente el ejemplo que acabamos de discutir, una propuesta de multiverso debe permitirnos determinar qué características físicas varían de un universo a otro; y para las características que varían, debemos ser capaces de calcular su distribución estadística a lo largo del multiverso. Para hacerlo es esencial un conocimiento del mecanismo cosmológico por el que el multiverso propuesto está poblado por universos (tales como la creación de universos burbuja en el multiverso paisaje). Es este mecanismo el que determina cuán dominante es un tipo de universo con respecto a otro, y por ello es este mecanismo el que determina la distribución estadística de características físicas. Si fuéramos afortunados, las distribuciones resultantes, ya sea a lo largo del multiverso entero o a lo largo de los universos que soportan vida, será suficientemente sesgada para dar predicciones definitivas.

Una segunda dificultad, si necesitamos invocar razonamiento antrópico, procede de la hipótesis central de que los seres humanos somos el tipo promedio. La vida podría ser rara en el multiverso; la vida inteligente podría ser más rara aún. Pero entre todos los seres inteligentes, dice la hipótesis antrópica, somos tan completamente típicos que nuestras observaciones deberían ser el promedio de lo que verían seres inteligentes que habiten en el multiverso. (Alexander Vilenkin lo ha llamado el principio de mediocridad). Si conocemos la distribución de características físicas a lo largo de universos que soportan vida, podemos calcular tales promedios. Pero ser típicos es una hipótesis espinosa. Si el trabajo futuro muestra que nuestras observaciones caen en el rango de los promedios calculados en un multiverso particular, la confianza en nuestra tipicalidad —y en la propuesta del multiverso — crecería. Eso sería excitante. Pero si nuestras observaciones caen fuera de los promedios, ello podría ser evidencia de que la propuesta del multiverso es errónea, o podría significar que sencillamente no somos típicos. Incluso en una vecindad con un 99 por 100 de perros labradores, usted puede tropezar con un doberman, un perro atípico. Distinguir entre una propuesta de multiverso fallida y una acertada en la que nuestro universo es atípico puede resultar difícil.[111]

Avances en esta cuestión requerirán probablemente un mejor conocimiento de cómo aparece la vida inteligente en un multiverso dado; con ese conocimiento, podríamos al menos clarificar cuán típica ha sido hasta ahora nuestra propia historia evolutiva. Ése es, por supuesto, un problema importante. Hasta la fecha, la mayoría de los razonamientos antrópicos ha evitado la cuestión invocando la hipótesis de Weinberg —que el número de formas de vida inteligente en un universo dado es proporcional al número de galaxias que contiene—. Hasta donde conocemos, la vida inteligente necesita un planeta caliente, que requiere una estrella, que es generalmente parte de una galaxia, y por

ello hay razones para creer que la aproximación de Weinberg es razonable. Pero puesto que sólo tenemos un conocimiento muy rudimentario incluso de nuestra propia génesis, la hipótesis sigue siendo tentativa. Para refinar nuestros cálculos hay que entender mucho mejor el desarrollo de la vida inteligente.

El tercer obstáculo es fácil de explicar, pero a largo plazo quizá será el que más dure. Tiene que ver con dividir hasta el infinito.

Dividiendo hasta el infinito

Para entender el problema, volvamos a los perros. Si usted vive en una vecindad poblada por tres labradores y un perro salchicha, entonces, ignorando complicaciones tales como cuán a menudo se saca a pasear a los perros, es tres veces más probable que tropiece con un labrador. Lo mismo valdría si hubiera trescientos labradores y cien perros salchicha; tres mil labradores y mil perros salchicha; tres millones de labradores y un millón de perros salchicha, y así sucesivamente. Pero ¿qué pasa si estos números fueran infinitamente grandes? ¿Cómo comparar una infinidad de perros salchicha con tres infinidades de labradores? Aunque esto suena como las matemáticas retorcidas de un juego de niños, hay aquí una pregunta real. ¿Es tres veces infinito mayor que el puro y simple infinito? Y si es así, ¿es tres veces mayor?

Las comparaciones que implican números infinitamente grandes son notoriamente peliagudas. En el caso de perros en la Tierra, por supuesto, la dificultad no aparece, porque las poblaciones son finitas. Pero en el caso de universos constituyentes de multiversos particulares, el problema puede ser muy real. Tomemos el multiverso inflacionario. Examinando el bloque de queso gruyer desde la perspectiva de un imaginario observador externo, veríamos que continúa creciendo y produciendo incesantemente nuevos universos. Eso es lo que significa «eterna» en «inflación eterna». Además, adoptando la perspectiva de un observador interno, hemos visto que cada universo burbuja alberga un número infinito de dominios separados, que llenan un multiverso mosaico. Al hacer predicciones, necesariamente nos enfrentamos a una infinidad de universos.

Para captar el desafío matemático, imaginemos que usted es un concursante en Let's Make a Deal[112] *y quiere ganar un premio inusual: una colección infinita de sobres tales que el primero contiene 1$, el segundo 2$, el tercero 3$, y así sucesivamente. Cuando la audiencia aplaude, Monty le hace una oferta: usted puede quedarse con su premio, tal como está, o puede elegir que él le doble los contenidos de cada sobre. Al principio parece obvio que debería aceptar el trato. «Cada sobre contendrá más dinero que el que contenía antes», piensa usted, «de modo que ésta tiene que ser la jugada correcta». Y si usted tuviera sólo un número finito de sobres, sí sería la jugada correcta. Cambiar cinco sobres que contienen 1$, 2$, 3$, 4$ y 5$ por sobres con 2$, 4$, 6$, 8$ y 10$ tiene un sentido incuestionable. Pero tras un momento de reflexión, usted empieza a dudar, porque se da cuenta de que el caso infinito está menos claro. «Si acepto el trato», piensa usted, «acabaré con sobres que contienen 2$, 4$, 6$ y así sucesivamente, recorriendo todos los números pares. Pero tal como están las cosas actualmente, mis sobres recorren todos los números enteros, tanto los pares como los impares. Parece que aceptando el trato estaré eliminando las cantidades impares de dólares de mi cuenta total. Eso no parece algo muy inteligente». Su cabeza empieza a dar vueltas. Comparado sobre con sobre, el trato parece bueno. Comparada colección con colección, el trato parece malo.*

Su dilema ilustra el tipo de paradoja matemática que hace tan difícil comparar colecciones infinitas. La audiencia se impacienta, usted tiene que tomar una decisión, pero su valoración del trato depende de la forma en que usted compara los dos resultados.

Una ambigüedad similar afecta a las comparaciones de una característica aún más básica de tales colecciones: el número de miembros que contiene cada una. El ejemplo de Let's Make a Deal también ilustra esto. ¿Qué hay más, números enteros o números pares? La mayoría de las personas diría que números enteros, puesto que sólo la mitad de los números enteros son pares. Pero su experiencia con Monty le da una idea más precisa. Imaginemos que usted acepta el trato que le ofrece Monty y acaba con todas las cantidades pares de dólares. Al hacerlo, usted no devolvería sobres ni exigiría sobres nuevos, puesto que Monty simplemente doblaría la cantidad de dinero en cada uno de ellos. Por consiguiente, usted concluye que el número de sobres que se requiere para acomodar todos los números enteros es el mismo que el número de sobres que se requieren para acomodar todos los números pares —lo que sugiere que las poblaciones de cada categoría son iguales (Tabla 7.1)—. Y eso es extraño. Por un método de comparación —considerar los números pares como un subconjunto de los números enteros—, usted concluye que hay más números enteros. Por un método de comparación diferente —considerar cuántos sobres se necesitan para contener los miembros de cada

grupo—, el conjunto de los números enteros y el conjunto de los números pares tienen poblaciones iguales.

Usted puede incluso convencerse de que hay más números pares que números enteros. Imaginemos que Monty ofreció cuadruplicar el dinero en cada uno de los sobres que usted tenía inicialmente, de modo que habría 4$ en el primero, 8$ en el segundo, 12$ en el tercero, y así sucesivamente. Puesto que, una vez más, el número de sobres implicados en el trato sigue siendo el mismo, esto sugiere que la cantidad de números enteros, donde empezó el trato, es igual a la cantidad de números divisibles por cuatro (Tabla 7.2), donde el trato terminó. Pero tal emparejamiento, que casa cada número entero con un número que es divisible por 4, deja un conjunto infinito de solteros pares —los números 2, 6, 10, y así sucesivamente— y así parece implicar que hay más pares que enteros.

TABLA 7.1. Cada número entero está emparejado con un número par, y viceversa, lo que sugiere que la cantidad de ellos es la misma.

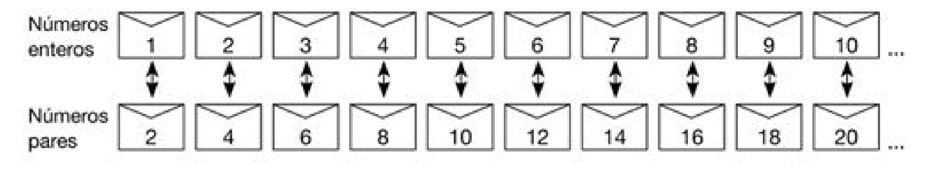
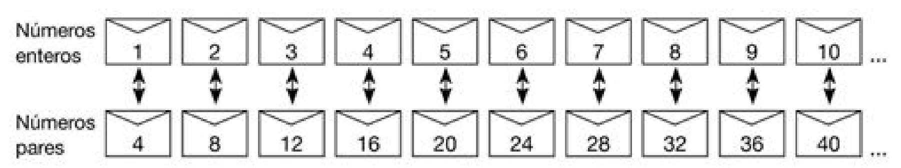


TABLA 7.1. Cada número entero está emparejado con un número par, y viceversa, lo que sugiere que la cantidad de ellos es la misma.



Desde una perspectiva, la población de números pares es menor que la de números enteros. Desde otra, las poblaciones son iguales. Y desde otra más, la población de números pares es mayor que la de números enteros. Y no es que una conclusión sea correcta y las otras erróneas. Sencillamente, no hay una respuesta absoluta a la pregunta de cuáles de estos tipos de colecciones infinitas son mayores. El resultado que usted encuentre depende de la manera en que haga la comparación.[113]

Esto plantea un rompecabezas para las teorías de multiverso. ¿Cómo determinamos si las galaxias y la vida son más abundantes en uno u otro tipo de universo cuando el número de universos implicados es infinito? La misma ambigüedad que acabamos de encontrar nos afectaría igualmente a menos que la física seleccione una base precisa sobre la que hacer las comparaciones. Los teóricos

han presentado propuestas, análogas a los emparejamientos dados en las tablas, que surgen de una u otra consideración física, pero todavía no se ha derivado y consensuado un procedimiento definitivo. E igual que en el caso de colecciones infinitas de números, diferentes aproximaciones dan resultados diferentes. Según una manera de comparar, preponderan universos con una serie de propiedades; según una manera alternativa, preponderan universos con propiedades diferentes.

La ambigüedad tiene un drástico impacto sobre lo que concluimos que son propiedades típicas o promedio en un multiverso dado. Los físicos llaman a esto el problema de la medida, un término matemático cuyo significado es sugerido por su nombre. Necesitamos un medio de medir los tamaños de diferentes colecciones infinitas de universos. Es esta información la que necesitamos para hacer predicciones. Es esta información la que necesitamos para calcular cuán probable es que residamos en un tipo de universo antes que en otro. Hasta que encontremos un dictamen fundamental sobre cómo deberíamos comparar colecciones de universos no seremos capaces de predecir matemáticamente lo que moradores de multiverso típicos —nosotros— deberían ver en experimentos y observaciones. Resolver este problema es imperativo.

Otro motivo de preocupación

He introducido el problema de la medida en la sección precedente no sólo porque es un impedimento formidable para la predicción, sino también porque puede entrañar otra consecuencia inquietante. En el capítulo 3 expliqué por qué la teoría inflacionaria se ha convertido en el paradigma cosmológico de facto. Un breve brote de rápida expansión durante los primeros momentos de nuestro universo habría permitido que regiones hoy distantes hubieran estado comunicadas anteriormente, lo que explica la temperatura común que han encontrado las medidas; la expansión rápida también alisa cualquier curvatura espacial, haciendo plana la forma del espacio, en línea con las observaciones; y finalmente, dicha expansión convierte las agitaciones cuánticas en minúsculas variaciones de temperatura a lo largo del espacio que son medibles en la radiación de fondo de microondas y esenciales para la formación de galaxias. Estos éxitos son un sólido argumento.[114] *Pero la versión eterna de la inflación tiene la capacidad de socavar la conclusión.*

Cuando quiera que los procesos cuánticos son relevantes, lo más que se puede hacer es predecir la probabilidad de un resultado con relación a otros. Los físicos experimentales, tomándoselo en serio, realizan experimentos una y otra vez, y con ellos adquieren resmas de datos sobre los que pueden hacer análisis estadísticos. Si la mecánica cuántica predice que un resultado es diez veces más probable que otro, entonces los datos deberían reflejar esta razón con mucha aproximación. Los cálculos del fondo cósmico de microondas, cuyo encaje con las observaciones es la prueba más convincente a favor de la teoría inflacionaria, se basan en fluctuaciones del campo cuántico, de modo que también son probabilistas. Pero, a diferencia de los experimentos de laboratorio, no pueden ser comprobados ejecutando el big bang una y otra vez. Entonces, ¿cómo se interpretan?

Bien, si las consideraciones teóricas concluyen, digamos, que hay un 99 por 100 de probabilidades de que los datos de microondas deberían tomar una forma y no otra, y si el resultado más probable es lo que los observadores vemos, los datos se toman como un fuerte apoyo a la teoría. La lógica del argumento es que si toda una colección de universos fuera producida por la misma física subyacente, la teoría predice que aproximadamente el 99 por 100 de ellos debería ser muy parecido a lo que observamos, y aproximadamente un 1 por 100 se desviaría significativamente.

Ahora bien, si el multiverso inflacionario tuviera una población de universos finita, podríamos concluir directamente que el número de universos extraños en donde los procesos cuánticos producen datos que no encajan con las expectativas sigue siendo, relativamente hablando, muy pequeño. Pero si, como en el multiverso inflacionario, la población de universos no es finita, la interpretación de los datos es mucho más difícil. ¿Qué es un 99 por 100 de infinito? Infinito. ¿Qué es un 1 por 100 de infinito? Infinito. ¿Cuál es mayor? La respuesta nos exige comparar dos colecciones infinitas. Y como hemos visto, incluso cuando parece claro que una colección infinita es mayor que otra, la conclusión a la que usted llega depende de su método de comparación.

El contrario a la idea concluye que cuando la inflación es eterna, las propias predicciones que utilizamos para construir nuestra confianza en la teoría se ven comprometidas. Cada posible resultado permitido por los cálculos cuánticos, por improbable que sea —un 0,1 por ciento de probabilidad cuántica, un 0,0001 por 100 de probabilidad cuántica, un 0,0000000001 por 100 de probabilidad cuántica— se realizaría en infinitos universos simplemente porque cualquiera de estos números multiplicado por infinito da infinito. Sin una receta fundamental para comparar colecciones infinitas no podemos decir que una colección de universos es mayor que las demás, y es por ello el

tipo de universo más probable del que podemos ser testigos; hemos perdido la capacidad de hacer predicciones definidas.

El optimista concluye que el espectacular acuerdo entre cálculos cuánticos en cosmología inflacionaria y datos, como en la Figura 3.5, debe reflejar una verdad profunda. Con un número finito de universos y observadores, la verdad profunda es que universos en que los datos se desvían de las predicciones cuánticas —aquellos con una probabilidad cuántica de un 0,1 por 100, o una probabilidad cuántica de un 0,0001 por 100, o una probabilidad cuántica de un 0,0000000001 por 100 — son realmente raros, y por eso es por lo que típicos habitantes del multiverso como nosotros no nos encontramos viviendo dentro de uno de ellos. Con un número infinito de universos, concluye el optimista, la verdad profunda debe ser que la rareza de universos anómalos, de alguna forma aún por establecer, sigue siendo válida. La expectativa es que algún día derivaremos una medida, un medio definido de comparar las diversas colecciones infinitas de universos, y que dichos universos que emergen de raras aberraciones cuánticas tendrán una medida minúscula comparada con los que emergen de resultados cuánticos probables. Lograr esto sigue siendo un enorme desafío, pero en su mayoría, los investigadores en el campo están convencidos de que el acuerdo en la Figura 3.5 significa que algún día lo lograremos.[115]

Misterios y multiversos:

¿Puede un multiverso ofrecer un poder explicativo del que de otra forma estaríamos privados?

Sin duda usted habrá notado que incluso las proyecciones más optimistas sugieren que las predicciones que emergen del marco de un multiverso tendrán un carácter diferente de las que tradicionalmente esperamos de la física. La precesión del perihelio de Mercurio, el momento dipolar magnético del electrón, la energía liberada cuando un núcleo de uranio se divide en bario y kriptón…, éstas son predicciones. Son resultado de detallados cálculos matemáticos basados en teoría física sólida y dan números precisos y comprobables. Y los números han sido verificados experimentalmente. Por ejemplo, los cálculos establecen que el momento magnético del electrón es 2,0023193043628; las medidas revelan que es 2,0023193043622. Dentro de los minúsculos márgenes de error inherentes a cada uno, el experimento confirma así la teoría hasta una parte en diez mil millones.

Desde donde estamos ahora, parece que las predicciones de multiverso nunca alcanzarán este nivel de precisión. En los escenarios más refinados podríamos ser capaces de predecir que es «altamente probable» que la constante cosmológica, o la intensidad de la fuerza electromagnética, o la masa del quark-arriba estén dentro de un rango de valores. Pero para hacerlo mejor necesitaremos muchísima suerte. Además de resolver el problema de la medida, necesitaremos descubrir una teoría de multiverso convincente con probabilidades profundamente sesgadas (tales como una probabilidad de un 99,9999 por 100 de que un observador se encuentre en un universo con una constante cosmológica igual al valor que medimos) o correlaciones sorprendentemente estrechas (tales como que los electrones existen sólo en universos con una constante cosmológica igual a 10^{-123}*). Si una propuesta de multiverso no tiene tales características favorables carecerá de la precisión que durante mucho tiempo ha distinguido la física de otras disciplinas. Para algunos investigadores, ése es un precio inaceptable de pagar.*

Durante un tiempo yo también adopté esa posición, pero mi opinión ha cambiado poco a poco. Como cualquier otro físico, yo prefiero predicciones claras, precisas e inequívocas. Pero yo y muchos otros hemos llegado a darnos cuenta de que aunque algunas características fundamentales del universo son susceptibles de tales predicciones matemáticas precisas, otras no lo son —o, cuando menos, es lógicamente posible que *pueda* haber características que están más allá de la predicción precisa—. Desde mediados de los años ochenta del siglo pasado, cuando yo era un joven estudiante graduado que trabajaba en teoría de cuerdas, había amplias expectativas de que la teoría explicaría algún día los valores de las masas de las partículas, las intensidades de las fuerzas, y el número de dimensiones espaciales, y lo mismo con cualquier otra característica física fundamental. Sigo teniendo esperanzas de que algún día alcancemos este objetivo. Pero también reconozco que es un difícil encargo para las ecuaciones de una teoría producir un número como la masa del electrón (0,0000000000000000000000091095 en unidades de la masa de Planck) o la masa del quark-top (0,0000000000000000632, en unidades de la masa de Planck).

Y cuando se llega a la constante cosmológica, el reto parece hercúleo. Un cálculo que después de páginas de manipulaciones y megavatios de funcionamiento de computador da como resultado el mismo número que ilustra el primer párrafo del capítulo 6… bien, no es imposible pero lleva al límite incluso el optimismo del optimista. Ciertamente, la teoría de cuerdas no parece estar hoy más cerca de calcular cualquiera de estos números que lo estaba cuando yo empecé a trabajar en ello. Esto no significa que ella, o alguna teoría futura, no tengan éxito algún día. Quizá el optimista tenga que ser todavía más imaginativo. Pero dada la física de hoy, tiene sentido considerar nuevos enfoques. Eso es lo que hace el multiverso.

En una propuesta de multiverso bien elaborada hay una delineación clara de las características físicas que tienen que enfocarse de forma diferente de la práctica estándar: aquellas que varían de un universo a otro. Y ésa es la fuerza del enfoque. Lo que es seguro esperar de una teoría de multiverso es un claro examen de qué misterios de un universo único persisten en el escenario de muchos universos, y cuáles no lo hacen.

La constante cosmológica es un ejemplo primordial. Si el valor de la constante cosmológica varía a lo largo de un multiverso dado, y lo hace en incrementos suficientemente finos, lo que fue una vez misterioso —su valor— sería ahora trivial. Así como una zapatería bien surtida tiene seguramente su número de zapato, un multiverso expansivo tiene seguramente universos con el valor de la constante cosmológica que hemos medido. Lo que generaciones de científicos se habrían esforzado valientemente en explicar, el multiverso lo habría hecho trivial. El multiverso habría mostrado que una cuestión aparentemente profunda e intrigante surgía de la hipótesis equivocada de que la constante cosmológica tiene un único valor. En este sentido es en el que una teoría de multiverso tiene la capacidad de ofre-

cer una importante fuerza explicatoria, y tiene capacidad para influir profundamente en el curso de la investigación científica.

Este razonamiento debe utilizarse con cuidado. ¿Qué hubiera pasado si Newton, después de la caída de la manzana, hubiera razonado que somos parte de un multiverso en el que las manzanas caen en algunos universos, suben en otros, y así la manzana que cae nos dice simplemente en qué tipo de universo habitamos, sin necesidad de más investigación? O ¿qué hubiera pasado si él hubiera concluido que en cada universo algunas manzanas caen mientras otras suben, y la razón de que veamos la variedad que cae es simplemente el hecho circunstancial de que, en nuestro universo, las manzanas que suben ya lo han hecho y por ello hace tiempo que han ido al espacio profundo? Éste es un ejemplo estúpido, por supuesto —nunca ha habido ninguna razón, teórica o cualquier otra, para tal cosa—, pero el punto es serio. Al invocar un multiverso, la ciencia podría debilitar el ímpetu por clarificar misterios concretos, incluso si algunos de esos misterios podrían estar maduros para explicaciones estándar sin multiverso. Cuando todo lo que se necesitaba realmente era trabajar más duro y pensar con más profundidad, podríamos ceder a la tentación de un multiverso y abandonar prematuramente los enfoques convencionales.

Este peligro potencial explica por qué algunos científicos tiemblan ante un razonamiento de multiverso. Por esto es por lo que una propuesta de multiverso que se tome en serio necesita estar fuertemente motivada por resultados teóricos, y debe expresar con precisión los universos de los que está compuesto. Debemos andarnos con mucho cuidado. Pero renunciar a un multiverso porque podría llevarnos a un callejón sin salida es igualmente peligroso. Haciéndolo, podríamos estar cerrando los ojos a la realidad.

8
Los muchos mundos de la medida cuántica
El multiverso cuántico

La valoración más razonable de las teorías de universos paralelos que hemos encontrado hasta ahora es decir que el veredicto está abierto. Extensión espacial infinita, inflación eterna, mundobranas, cosmología cíclica, paisaje de teoría de cuerdas —estas intrigantes ideas han surgido de un abanico de desarrollos científicos—. Pero cada una de ellas sigue siendo tentativa, como lo son las propuestas de multiverso que cada una ha generado. Aunque muchos físicos están dispuestos a ofrecer sus opiniones, en pro y en contra, sobre estos esquemas de multiverso, la mayoría reconoce que percepciones futuras —teóricas, experimentales y observacionales— determinarán si alguna llega a ser parte del canon científico.

El multiverso que abordaremos ahora, que surge de la mecánica cuántica, se ve de forma muy diferente. Muchos físicos ya han llegado a un veredicto final sobre este multiverso particular. Lo que pasa es que no todos han llegado al mismo veredicto. Las diferencias se reducen al profundo y aún no resuelto problema de navegar desde el marco probabilista de la mecánica cuántica hasta la definida realidad de la experiencia común.

En 1954, casi treinta años después de que se hubieran sentado los fundamentos de la teoría cuántica por luminarias como Niels Bohr, Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, un desconocido estudiante graduado de la Universidad de Princeton llamado Hugh Everett III llegó a una extraordinaria conclusión. Su análisis, que se centraba en un enorme agujero alrededor del cual había danzado Bohr, el gran maestro de la mecánica cuántica, pero no había conseguido llenar, reveló que una comprensión adecuada de la teoría podría requerir una inmensa red de universos paralelos. La idea de Everett fue una de las primeras ideas motivadas matemáticamente que sugería que podríamos ser parte de un multiverso.

La aproximación de Everett, que con el tiempo se llamaría la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica, ha tenido una accidentada historia. En enero de 1956, tras haber desarrollado las consecuencias matemáticas de su nueva propuesta, Everett envió un borrador de su tesis a John Wheeler, su tutor de doctorado. Wheeler, uno de los más famosos pensadores de la física del siglo XX, quedó completamente impresionado. Pero en mayo, cuando Wheeler visitó a Bohr en Copenhague y discutió las ideas de Everett, la acogida fue gélida. Bohr y sus seguidores habían pasado décadas refinando su visión de la mecánica cuántica. Para ellos, las preguntas que planteaba Everett, y la heterodoxa manera en que pensaba que deberían ser abordadas, no tenían demasiado interés.

Wheeler tenía a Bohr en una altísima consideración, y por ello puso empeño en apaciguar a su veterano colega. En respuesta a las críticas, Wheeler retrasó la admisión de la tesis de Everett y le obligó a modificarla sustancialmente. Everett tenía que cortar esas partes abiertamente críticas de la metodología

de Bohr y resaltar que sus resultados pretendían clarificar y extender la formulación convencional de la teoría cuántica. Everett se resistió, pero ya había aceptado un trabajo en el Departamento de Defensa (donde pronto iba a desempeñar un importante papel entre bastidores en la política de armamento nuclear en las administraciones de Eisenhower y Kennedy) que requería un doctorado, de modo que accedió a hacerlo con renuencia. En marzo de 1957, Everett envió una versión sustancialmente recortada de su tesis original; en abril fue aceptada por Princeton como cumplimiento de sus restantes requisitos, y en julio fue publicada en *Reviews of Modern Physics*.[116] Pero dado que la aproximación de Everett a la teoría cuántica había sido ya rechazada por Bohr y su entorno, y había sido silenciada la visión expresada en la tesis original, el artículo fue ignorado.[117]

Diez años más tarde, el renombrado físico Bryce DeWitt sacó el trabajo de Everett de la oscuridad. DeWitt, inspirado por los resultados de su estudiante graduado Neill Graham, que había elaborado más las matemáticas de Everett, se hizo portavoz del replanteamiento de Everett de la teoría cuántica. Además de publicar varios artículos técnicos que llevaron las ideas de Everett a una pequeña pero influyente comunidad de especialistas, en 1970 DeWitt escribió un resumen a un nivel elemental para *Physics Today* que alcanzó una audiencia científica mucho más amplia. Y a diferencia del artículo de Everett de 1957, que rehuía hablar de otros mundos, DeWitt subrayó esta característica ilustrándola con una reflexión inocente acerca del *shock* que le produjo conocer la conclusión de Everett de que somos parte de un «multimundo» enorme. El artículo generó una respuesta importante en una comunidad física que se había hecho más receptiva a modificar la ideología cuántica ortodoxa y encendió un debate, aún en curso, que concierne a la naturaleza de la realidad cuando, como creemos que lo hacen, las leyes cuánticas dominan.

Permítame fijar el escenario.

El cambio en el conocimiento que tuvo lugar entre aproximadamente 1900 y 1930 dio como resultado un feroz asalto a la intuición, el sentido común y las leyes bien aceptadas que la nueva vanguardia pronto empezó a llamar «física clásica», un término que conlleva el peso y el respeto dado a una imagen de la realidad que es al mismo tiempo venerable, inmediata, satisfactoria y predictiva. Dígame cómo son las cosas ahora, y utilizaré las leyes de la física clásica para predecir cómo serán las cosas en cualquier momento en el futuro, o cómo eran en cualquier momento en el pasado. Sutilezas tales como el caos (en el sentido técnico: ligeros cambios en cómo son las cosas ahora pueden llevar a enormes errores en las predicciones) y la complejidad de las ecuaciones dificultan la puesta en práctica de este programa en todas las situaciones salvo las más simples, pero las leyes propiamente dichas son inquebrantables en su tratamiento de un pasado y futuro definitivos.

La revolución cuántica requería que abandonáramos la perspectiva clásica porque nuevos resultados establecieron que era demostrablemente errónea. Para el movimiento de objetos grandes como la Tierra y la Luna, o de objetos cotidianos como piedras y bolas, las ideas clásicas hacen un buen trabajo de predicción y descripción. Pero pasemos al micromundo de moléculas, átomos y partículas subatómicas, y las leyes clásicas fallan. En contradicción con el corazón mismo del razonamiento clásico, si usted realiza experimentos idénticos sobre partículas idénticas que han sido preparadas de forma idéntica, no obtendrá en general idénticos resultados.

Imaginemos, por ejemplo, que usted tiene cien cajas idénticas, cada una de las cuales contiene un electrón, preparadas de acuerdo con un procedimiento de laboratorio idéntico. Al cabo de exactamente diez minutos, usted y noventa y nueve colegas miden las posiciones de cada uno de los cien electrones. Pese a

lo que Newton, Maxwell e incluso un joven Einstein habrían previsto —probablemente habrían estado dispuestos a jugarse la vida en ello—, las cien medidas no darán el mismo resultado. De hecho, a primera vista los resultados parecerán aleatorios, con algunos electrones encontrados cerca de la esquina inferior izquierda de su caja, algunos cerca de la parte trasera superior derecha, algunos en el centro y así sucesivamente.

Las regularidades y pautas que hacen de la física una disciplina rigurosa y predictiva se hacen patentes sólo si usted realiza este mismo experimento con cien electrones en cien cajas, una y otra vez. Si usted lo hiciera así, esto es lo que encontraría: si su primera serie de cien medidas encontrara un 27 por 100 de los electrones cerca de la esquina inferior izquierda, un 48 por 100 cerca de la esquina superior derecha y un 25 por 100 cerca del centro, entonces la segunda serie daría una distribución muy similar. También lo harían la tercera, la cuarta, y las que siguen. Por consiguiente, la regularidad no es evidente en ninguna medida individual; usted no puede predecir dónde estará cualquier electrón dado. En su lugar, la regularidad se encuentra en la *distribución estadística* de muchas medidas. Es decir, la regularidad habla de la *probabilidad* de encontrar un electrón en una localización concreta.

El logro fundamental de los fundadores de la mecánica cuántica fue desarrollar un formalismo matemático que prescindía de las predicciones absolutas intrínsecas a la física clásica y en su lugar predecía dichas probabilidades. Partiendo de una ecuación que Schrödinger publicó en 1926 (y una ecuación equivalente aunque algo más complicada que Heisenberg escribió en 1925), los físicos pueden introducir los detalles de cómo son ahora las cosas y calcular luego la probabilidad de que sean de una manera, o de otra, o de otra más, en cualquier momento en el futuro.

Pero no se engañe por la simplicidad de mi ejemplo del electrón. La mecánica cuántica no sólo se aplica a electrones, sino a todo tipo de partículas, y no nos habla sólo de sus posiciones, sino también de sus velocidades, sus momentos angulares, sus energías y de cómo se comportan en un amplio abanico de situaciones, desde la andanada de neutrinos que ahora atraviesan su cuerpo hasta las frenéticas fusiones atómicas que tienen lugar en los núcleos de estrellas lejanas. En un barrido tan amplio, las predicciones probabilistas de la mecánica cuántica encajan con los datos experimentales. Siempre. En los más de ochenta años transcurridos desde que estas ideas fueron desarrolladas, no ha habido un solo experimento verificable u observación astrofísica cuyos resultados estén en conflicto con las predicciones de la mecánica cuántica.

Que una generación de físicos haya afrontado un cambio tan radical respecto a las ideas formadas a partir de miles de años de experiencia colectiva y, en respuesta a ello, haya reconsiderado la realidad dentro de un marco completamente nuevo basado en probabilidades, es un logro intelectual sin parangón. Pero un detalle incómodo se cierne sobre la mecánica cuántica desde su concepción —un detalle que eventualmente abría un camino a los universos paralelos—. Para entenderlo, tenemos que examinar un poco más de cerca el formalismo cuántico.

El rompecabezas de las alternativas

En abril de 1925, durante un experimento en los Bell Labs emprendido por dos físicos americanos, Clinton Davisson y Lester Germer, un tubo de cristal que contenía un fragmento de níquel caliente explotó repentinamente. Davisson y Germer

llevaban días dedicados a disparar haces de electrones contra muestras de níquel para investigar diversos aspectos de las propiedades atómicas del metal; el fallo del equipo era una molestia, aunque no fuera demasiado infrecuente en el trabajo experimental. Al limpiar los trozos de cristal, Davisson y Germer advirtieron que el níquel se había dañado en la explosión. No mucho, por supuesto. Todo lo que tenían que hacer era calentar la muestra, evaporar el contaminante y empezar de nuevo. Y así lo hicieron. Pero esa elección, limpiar la muestra en lugar de optar por una nueva, resultó afortunada. Cuando dirigieron el haz de electrones al níquel recién limpiado, los resultados fueron completamente diferentes de cualquiera que ellos o cualquier otro habían encontrado nunca. En 1927 estaba claro que Davisson y Germer habían establecido una característica esencial de la teoría cuántica en rápido desarrollo. Y en menos de una década, su descubrimiento fortuito sería honrado con el premio Nobel.

Aunque la demostración de Davisson y Germer antecede al cine sonoro y a la Gran Depresión, sigue siendo el método más ampliamente utilizado para introducir las ideas esenciales de la teoría cuántica. He aquí cómo pensar en ello. Cuando Davisson y Germer calentaron la muestra contaminada provocaron que numerosos cristales pequeños de níquel se fusionaran en unos pocos cristales más grandes. A su vez, su haz de electrones ya no se reflejaba en una superficie de níquel altamente uniforme, sino que más bien rebotaba en unas pocas localizaciones concentradas donde estaban centrados los cristales de níquel más grandes. Una versión simplificada de su experimento, el montaje de la Figura 8.1, en que se disparan electrones contra una barrera que contiene dos rendijas estrechas, ilustra la física esencial. Los electrones que salen de una rendija o la otra son como los electrones que rebotan en un cristal de níquel o en su vecino. Modelada de esta manera, Davisson y Germer estaban lle-

vando a cabo la primera versión de lo que ahora se denomina el *experimento de la doble rendija*.

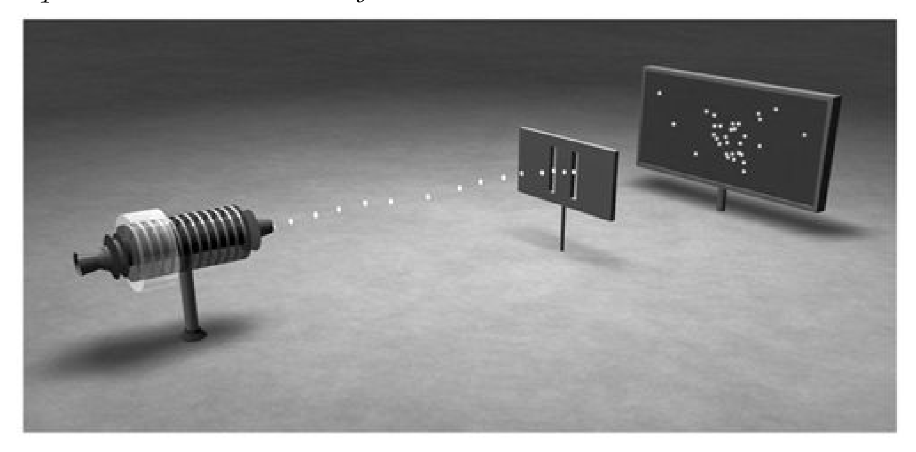
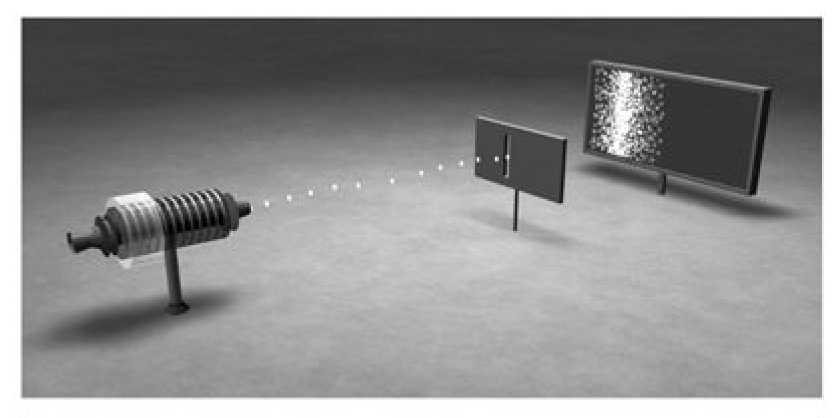
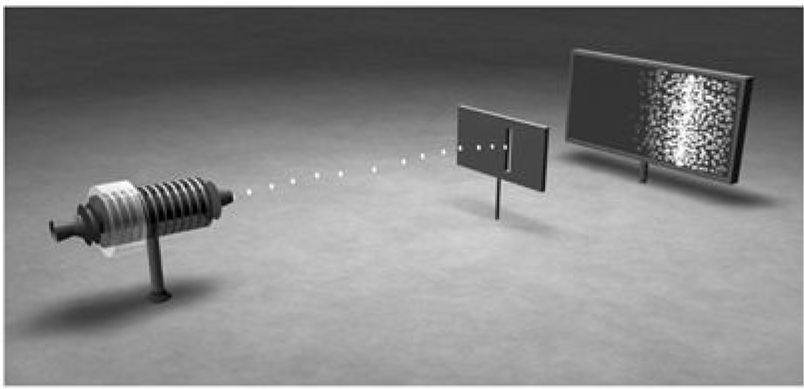


FIGURA 8.1. La esencia del experimento de Davisson y Germer se recoge en el montaje de la «doble rendija» en el que se disparan electrones contra una barrera que tiene dos rendijas estrechas. En el experimento de Davisson y Germer, se producen dos haces de electrones cuando los electrones incidentes rebotan en cristales de níquel vecinos; en el experimento de la doble rendija, dos haces similares son producidos por electrones que atraviesan las rendijas vecinas.

Para captar el sorprendente resultado de Davisson y Germer, imaginemos que cerramos o bien la rendija izquierda o bien la derecha y registramos los electrones que la atraviesan, uno a uno, en una pantalla detectora. Después de que muchos de estos electrones hayan sido disparados, las pantallas detectoras se parecerán a las de la Figura 8.2a y la Figura 8.2b. Una mente racional no entrenada en el mundo cuántico esperaría que, cuando ambas rendijas están abiertas, los datos fueran una amalgama de estos dos resultados. Pero el hecho sorprendente es que *no* es esto lo que sucede. En su lugar, Davisson y Germer encontraron datos, muy similares a los ilustrados en la Figura 8.2c, que consisten en bandas brillantes y oscuras que indican

una serie de posiciones donde los electrones inciden y no inciden.





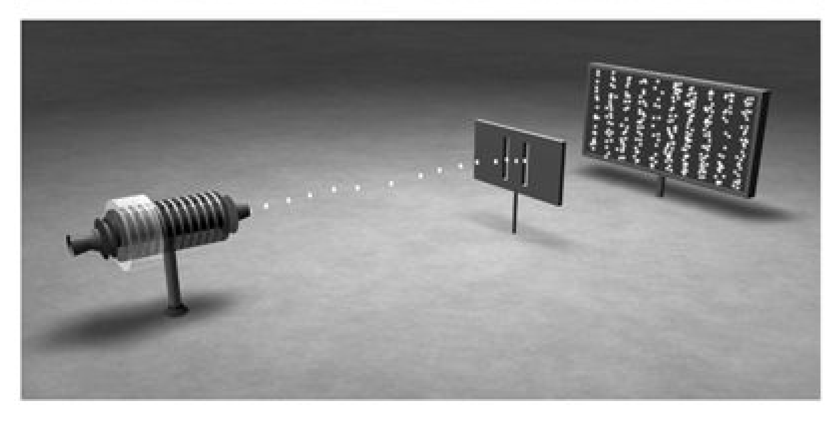


FIGURA 8.2. (a) Los datos obtenidos cuando se disparan los electrones y sólo la rendija izquierda está abierta. (b) Los datos obtenidos cuando se disparan los electrones y sólo la rendija dere-

cha está abierta. (c) Los datos obtenidos cuando se disparan los electrones y ambas rendijas están abiertas.

Estos resultados se desvían de las expectativas de una forma que es especialmente peculiar. Las bandas oscuras son lugares donde los electrones son copiosamente detectados si sólo está abierta la rendija izquierda o sólo está abierta la rendija derecha (las regiones correspondientes en las Figuras 8.2a y 8.2b son *brillantes*), pero que son aparentemente inalcanzables cuando ambas rendijas son accesibles. *La presencia de la rendija izquierda cambia así los posibles lugares de incidencia de los electrones que atraviesan la rendija derecha, y viceversa.* Esto es totalmente desconcertante. En la escala de una partícula minúscula como un electrón, la distancia entre las rendijas es enorme. Por eso, cuando el electrón atraviesa una rendija, ¿cómo podría tener cualquier efecto la presencia o la ausencia de la otra rendija, y ya no digamos la drástica influencia evidente en los datos? Es como si durante muchos años usted entrara sin problemas en un edificio de oficinas utilizando una puerta, pero cuando la dirección finalmente añade una segunda puerta en la otra fachada del edificio, usted ya no pudiera llegar a su oficina.

¿Qué vamos a hacer con esto? El experimento de la doble rendija nos lleva inevitablemente a una conclusión difícil de imaginar. Independientemente de cuál sea la rendija que atraviesa, cada electrón individual «conoce» de alguna forma la existencia de ambas. Hay algo asociado con, o conectado a, o una parte de cada electrón individual que es afectado por ambas rendijas.

Pero ¿qué podría ser este algo?

Ondas cuánticas

Para encontrar una clave de cómo un electrón que atraviesa una rendija «sabe» que existe la otra, examinemos más detenidamente los datos de la Figura 8.2c. El patrón brillante-oscuro-brillante-oscuro es tan reconocible para un físico como la cara de una madre es para su bebé. El patrón dice —mejor, grita— *ondas*. Si usted ha dejado caer alguna vez dos piedras en un estanque y ha observado como se dispersan y se solapan las ondulaciones, entenderá lo que quiero decir. Donde el pico de una onda se cruza con el pico de otra, la altura de la onda combinada es grande; donde el vientre de una onda se cruza con el vientre de otra, la depresión de la onda combinada es profunda; y lo más importante de todo, donde el pico de una onda se cruza con el vientre de la otra, las ondas se anulan y el agua conserva su nivel. Esto se ilustra en la Figura 8.3. Si usted introdujera una pantalla detectora en la parte superior de la Figura que registra la agitación del agua en cada lugar —cuanto mayor es la agitación, más brillante es la lectura—, el resultado sería una serie de regiones alternativamente brillantes y oscuras en la pantalla. Las regiones brillantes serían aquellas en que las ondas se refuerzan mutuamente, dando mucha agitación; las regiones oscuras serían aquellas donde las ondas se anulan, y no dan agitación. Los físicos dicen que las ondas que se solapan *interfieren* entre sí, y llaman *figura de interferencia* a los datos brillante-oscuro-brillante que producen.

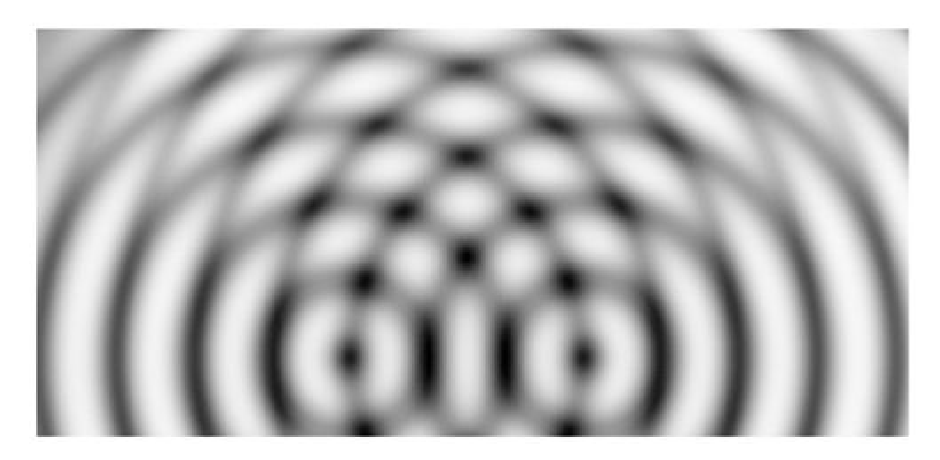


FIGURA 8.3. Cuando se solapan dos ondas de agua, ellas «interfieren», lo que crea regiones alternas de mayor o menor agitación que forman lo que se denomina una figura de interferencia.

La similitud con la Figura 8.2c es inconfundible, de modo que al tratar de explicar los datos del electrón nos vemos llevados a pensar en ondas. Eso esta bien. Es un inicio. Pero los detalles son aún oscuros. ¿Qué tipo de ondas? ¿Dónde están? ¿Y qué tienen que ver con partículas tales como electrones?

La siguiente clave procede del hecho experimental que destaqué al comienzo. Resmas de datos sobre el movimiento de las partículas muestran que las regularidades sólo emergen estadísticamente. Las mismas medidas realizadas sobre partículas preparadas de la misma forma revelarán en general que están en diferentes lugares; pero muchas de estas medidas establecen que, en promedio, las partículas tienen la misma probabilidad de ser encontradas en cualquier localización dada. En 1926, el físico alemán Max Born juntó estas dos claves y con ellas hizo un salto que aproximadamente tres décadas más tarde le valió el premio Nobel. Se ha obtenido evidencia experimental de que las ondas desempeñan un papel. Se ha obtenido evidencia experimental de que las probabilidades desempeñan un papel. Quizá, sugirió Bohr, la onda asociada con una partícula es una *onda de probabilidad.*

Fue una contribución espectacularmente original y sin precedentes. La idea es que al analizar el movimiento de una partícula no deberíamos pensar en ella como una piedra lanzada de un lugar a otro. Más bien, deberíamos pensar en ella como una onda que se *ondula* de un lugar a otro. Las localizaciones en donde los valores de la onda son grandes son las localizaciones donde es probable encontrar la partícula. Localizaciones donde los valores de las ondas son pequeños son localizaciones donde es improbable encontrar la partícula. Localizaciones donde los valores de la onda se anulan son lugares donde no va a encontrarse la partícula. Conforme la onda avanza, los valores evolucionan, aumentando en algunas localizaciones y disminuyendo en otras. Y puesto que estamos interpretando los valores ondulantes como probabilidades ondulantes, la onda se llama una onda de probabilidad.

Para completar la imagen, consideremos cómo explica los datos de la doble rendija. Cuando un electrón viaja hacia la barrera de la Figura 8.2c, la mecánica cuántica nos dice que lo consideremos como una onda ondulante, como en la Figura 8.4. Cuando la onda llega a la barrera, dos fragmentos de onda atraviesan las rendijas y salen ondulando hacia la pantalla detectora. Lo que sucede a continuación es clave. Igual que ondas de agua que se solapan, las ondas de probabilidad que salen de las dos rendijas se solapan e interfieren, dando una forma combinada muy parecida a la de la Figura 8.3: un patrón de valores altos y bajos que, según la mecánica cuántica, corresponde a un patrón de probabilidades altas y bajas para la incidencia de los electrones. Cuando se dispara un electrón tras otro, las posiciones de incidencia acumuladas se conforman a este perfil de probabilidad. Muchos electrones inciden donde la probabilidad es alta, pocos donde es baja, y ninguno donde la probabilidad es nula. El resultado es las bandas brillantes y oscuras de la Figura 8.2c.[118]

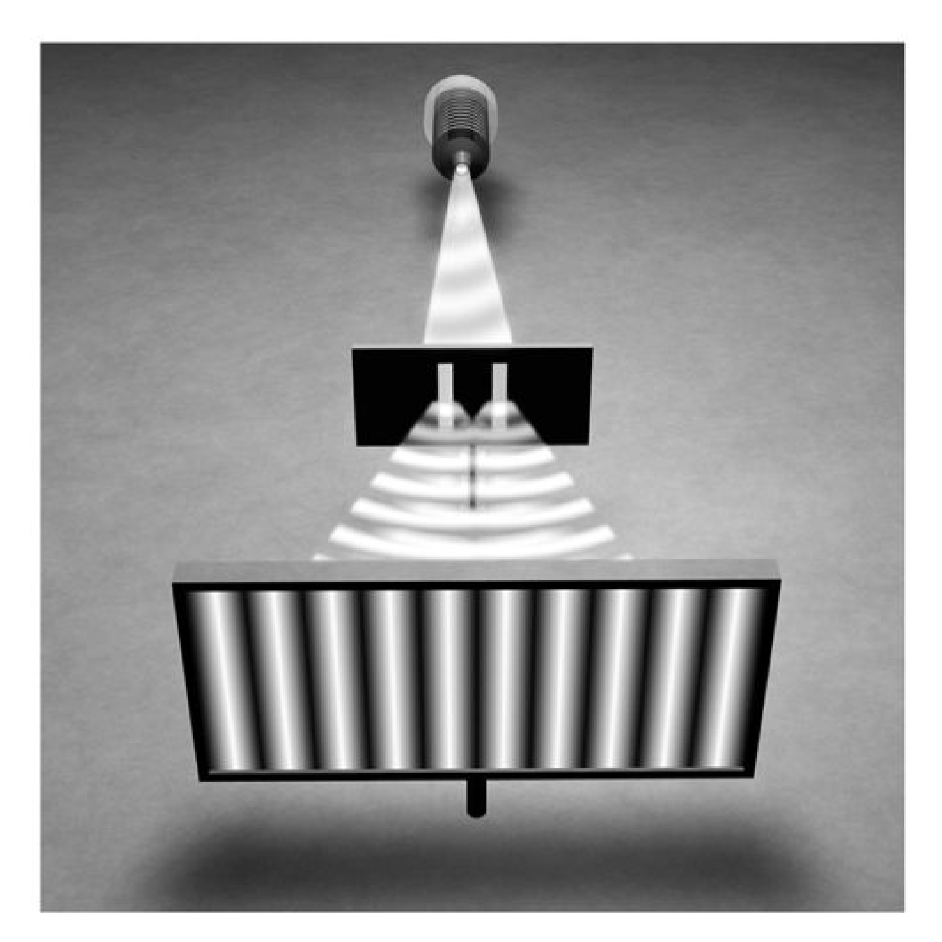


FIGURA 8.4. Cuando describimos el movimiento de un electrón en términos de una onda de probabilidad ondulante se explican los enigmáticos datos de interferencia.

Y así es como la teoría cuántica explica los datos. La descripción pone de manifiesto que cada electrón *sí* «sabe» de la existencia de ambas rendijas, puesto que la onda de probabilidad de cada electrón pasa a través de ambas. Es la unión de estas dos ondas parciales la que dicta las probabilidades para la incidencia de los electrones. Por esto es por lo que la mera presencia de una segunda rendija afecta a los resultados.

Aunque me he centrado en electrones, experimentos similares han establecido la misma imagen de onda de probabilidad para todos los constituyentes básicos de la naturaleza. Fotones, neutrinos, muones, quarks —todas las partículas fundamentales — se describen mediante ondas de probabilidad. Pero antes de cantar victoria, surgen inmediatamente tres preguntas. Dos son sencillas. Una es un hueso. Es la última la que Everett trataba de responder en los años cincuenta y la que le llevó a una versión cuántica de los mundos paralelos.

Primera, si la teoría cuántica es correcta y el mundo se despliega de forma probabilista, ¿por qué el marco no probabilista de Newton es tan bueno para predecir el movimiento de objetos desde bolas de béisbol hasta planetas y estrellas? La respuesta es que las ondas de probabilidad para objetos grandes tienen normalmente (pero no siempre, como pronto veremos) una forma muy particular. Son extraordinariamente estrechas, como en la Figura 8.5a, lo que significa que hay una enorme probabilidad, prácticamente del 100 por 100, de que el objeto esté situado donde la onda tiene un pico, y una minúscula probabilidad, sólo una sombra por encima del 0 por 100, de que esté localizado en cualquier otro lugar.[119] Además, las leyes cuánticas muestran que los picos de tales ondas estrechas se mueven a lo largo de las mismas trayectorias que salen de las ecuaciones de Newton. Y así, aunque las leyes de Newton predicen exactamente la trayectoria de una bola de béisbol, la teoría cuántica ofrece solo un mínimo refinamiento, pues dice que hay una probabilidad próxima al 100 por 100 de que la bola aterrice donde Newton dice que debería hacerlo, y una probabilidad próxima al 0 por 100 de que no lo haga.



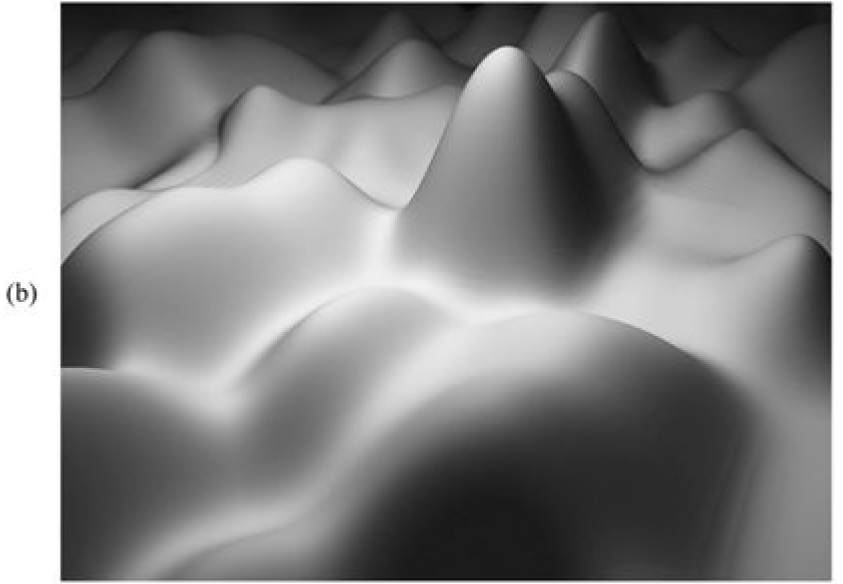


FIGURA *8.5. (a) La onda de probabilidad para un objeto macroscópico es generalmente una onda estrecha y puntiaguda. (b) La onda de probabilidad para un objeto microscópico, digamos, una única partícula, está normalmente muy extendida.*

De hecho, las palabras «prácticamente» y «casi» no hacen justicia a la física. La probabilidad de que un cuerpo macroscópico se desvíe de las predicciones de Newton es tan fantásticamente minúscula que si usted hubiera estado observando el cosmos durante los últimos miles de millones de años, la probabilidad de que nunca lo hubiera visto suceder es aplastante. Pero según la teoría cuántica, cuanto más pequeño es un objeto, más extendida está normalmente su onda de probabilidad. Por ejemplo, la onda de un electrón típico podría parecerse a la de la Figura 8.5b, con probabilidades sustanciales de estar en varias localizaciones, un concepto totalmente extraño en un mundo newtoniano. Y ésa es la razón por la que es en el microcosmos donde se manifiesta la naturaleza probabilista de la realidad.

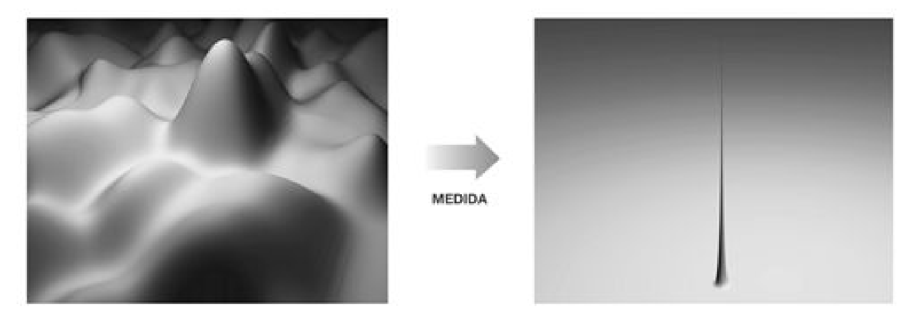


FIGURA 8.6. La aproximación de Copenhague a la mecánica cuántica imagina que cuando se mide u observa, la onda de probabilidad de una partícula colapsa instantáneamente en todas las localizaciones salvo en una. El abanico de posiciones posibles para la partícula se transforma en un resultado definido.

Segundo, ¿podemos ver las ondas de probabilidad sobre las que descansa la mecánica cuántica? ¿Hay alguna manera de acceder directamente a la poco familiar neblina probabilista, tal como la ilustrada esquemáticamente en la Figura 8.5b, en la que una única partícula tiene probabilidades de ser encontrada en varias localizaciones? No. La aproximación estándar a la mecánica cuántica, desarrollada por Bohr y su grupo, y llamada en

su honor *interpretación de Copenhague*, imagina que cuando quiera que usted trata de ver una onda de probabilidad, el propio acto de observación impide su intento. Cuando usted examina la onda de probabilidad de un electrón, donde «examinar» significa «medir su posición», el electrón responde cuadrándose y materializándose en una localización definida. En correspondencia, la onda de probabilidad toma un valor del 100 por 100 en ese punto, al tiempo que colapsa a un valor del 0 por 100 en cualquier otro lugar, como en la Figura 8.6. Deje de mirar, y la onda de probabilidad fina como una aguja se ensancha rápidamente, lo que indica que vuelve a haber una probabilidad razonable de encontrar el electrón en varios lugares. Volvamos a mirar, y la onda del electrón colapsa de nuevo, lo que elimina el abanico de lugares posibles en donde podría encontrarse el electrón que ahora pasa a ocupar un único punto definido. En resumen, cada vez que usted intenta ver la niebla probabilista, ésta desaparece —colapsa— y es suplantada por la realidad familiar. La pantalla detectora en la Figura 8.2c ofrece un ejemplo oportuno: mide la onda de probabilidad incidente de un electrón y al hacerlo hace que colapse inmediatamente. El detector obliga al electrón a rechazar las muchas opciones de incidencia disponibles y se asienta en un lugar de aterrizaje definido, que entonces queda manifiesto por un minúsculo punto en la pantalla.

Si esa explicación le hace mover la cabeza negativamente, lo entiendo perfectamente. No hay que negar que el dogma cuántico suena un poco como una panacea. Lo que quiero decir es que llega una teoría que propone una imagen de la realidad extraordinariamente nueva basada en ondas de probabilidad y luego, inmediatamente después, anuncia que las ondas no se pueden ver. Imagine a una mujer diciendo que ella es rubia… hasta que alguien mira, momento en que ella se convierte inmediatamente en pelirroja. ¿Por qué aceptarían los físicos una

aproximación que no sólo es extraña, sino que parece completamente absurda?

Afortunadamente, pese a todas sus características misteriosas y ocultas, la mecánica cuántica se puede poner a prueba. Según los copenhaguistas, cuanto más alto es el valor de una onda de probabilidad en una localización concreta, mayor es la probabilidad de que, cuando la onda colapse, su único pico remanente —y con ello el propio electrón— esté situado allí. Ese enunciado da predicciones. Realice un experimento dado una y otra vez, cuente cuántas veces encuentra la partícula en diversas localizaciones, y valore si las frecuencias que observa coinciden con las probabilidades dictadas por la onda de probabilidad. Si la onda es *aquí* 2,874 veces mayor que *allí*, ¿encuentra la partícula *aquí* 2,874 veces más que la encuentra *allí*? Predicciones como éstas han sido enormemente acertadas. Por artera que pueda parecer la perspectiva cuántica, es difícil discutir con tales resultados.

Pero no imposible.

Lo que nos lleva a la tercera y más difícil pregunta. El colapso de las ondas de probabilidad en una medida, Figura 8.6, es un elemento central de la aproximación de Copenhague a la mecánica cuántica. La confluencia de sus predicciones acertadas y el fuerte proselitismo de Bohr llevaron a que la mayoría de los físicos la aceptara, pero basta un pequeño empujón para revelar rápidamente que hay un aspecto incómodo. La ecuación de Schrödinger, el motor matemático de la mecánica cuántica, dicta cómo evolucionará en el tiempo la forma de una onda de probabilidad. Deme una forma de onda inicial, digamos, la de la Figura 8.5b, y yo puedo utilizar la ecuación de Schrödinger para dibujar una imagen de cómo sería la onda dentro de un minuto, una hora o en cualquier otro momento. Pero un análisis directo de la ecuación muestra que la evolución mostrada en la Figura 8.6 —el colapso instantáneo de una onda en todos

los puntos salvo uno, como un feligrés en una megaiglesia que accidentalmente permanece de pie cuando todos los demás se arrodillan— no puede salir de las matemáticas de Schrödinger. Por supuesto, las ondas pueden tener una forma de aguja fina; pronto haremos amplio uso de algunas ondas puntiagudas. Pero no pueden *hacerse* puntiagudas de la manera ideada por la aproximación de Copenhague. Las matemáticas sencillamente no lo permiten. (Veremos por qué en un momento).

Bohr avanzó un remedio complicado: las ondas de probabilidad evolucionan de acuerdo con la ecuación de Schrödinger cuando usted no está mirando o realizando algún tipo de medida. Pero cuando usted mira, continúa Bohr, debería dejar de lado la ecuación de Schrödinger y declarar que su observación ha provocado que la onda colapse.

Ahora bien, esta receta no sólo es poco elegante, no sólo es arbitraria, no sólo carece de un soporte matemático, sino que ni siquiera es *clara*. Por ejemplo, no define con precisión qué es «mirar» o «medir». ¿Debe estar involucrado un ser humano? O, como Einstein preguntó en cierta ocasión, ¿bastará la mirada de reojo de un ratón? ¿Qué pasa con una sonda de computador o incluso el toque de una bacteria o un virus? ¿Hacen estas «medidas» que colapse la onda de probabilidad? Bohr anunció que él estaba trazando una línea en la arena que separaba cosas pequeñas, tales como átomos y sus constituyentes, a las que se aplicaría la ecuación de Schrödinger, de cosas grandes, tales como experimentadores y sus aparatos, a las que no se aplicaría. Pero él nunca dijo dónde estaría exactamente dicha línea. La realidad es que no podía hacerlo. Cada año que pasa, los experimentadores confirman que la ecuación de Schrödinger funciona, sin modificación, para colecciones cada vez más grandes de partículas, y hay todas las razones para creer que funciona para colecciones tan enormes como las que le constituyen a usted, a mí y a cualquier otra cosa. Como una riada que brota lentamen-

te de sus cimientos, penetra en su sala de estar y amenaza con inundar su ático, las matemáticas de la mecánica cuántica han desbordado el dominio atómico y han tenido éxito en escalas cada vez mayores.

Así que la forma de considerar el problema es ésta. Usted y yo y los computadores y las bacterias y los virus y cualquier otro material estamos hechos de moléculas y de átomos, que a su vez están compuestos de partículas como electrones y quarks. La ecuación de Schrödinger funciona para electrones y quarks, y toda la evidencia apunta a que funciona para cosas formadas por estos constituyentes, independientemente del número de partículas implicadas. Esto significa que la ecuación de Schrödinger debería seguir aplicándose durante una medida. Después de todo, una medida es sólo una colección de partículas (la persona, el aparato, el computador…) que entra en contacto con otra (la partícula o partículas que son medidas). Pero si es así, si las matemáticas de Schrödinger se niegan a someterse, entonces Bohr está en dificultades. La ecuación de Schrödinger no permite que las ondas colapsen. Un elemento esencial de la aproximación de Copenhague estaría así socavado.

De modo que la tercera pregunta es: si el razonamiento recién expuesto es correcto y las ondas de probabilidad no colapsan, ¿cómo pasamos del abanico de resultados posibles que existen antes de una medida al resultado único que revela la medida? O por decirlo en términos más generales, ¿qué le sucede a una onda de probabilidad durante una medida que permite que aparezca una única realidad familiar y definida?

Everett consideró esta pregunta en su tesis doctoral en Princeton y llegó a una conclusión imprevista.

Para entender la ruta del descubrimiento de Everett, usted necesita saber algo más sobre la ecuación de Schrödinger. He resaltado que no permite que las ondas de probabilidad colapsen repentinamente. Pero ¿por qué no? Y ¿qué permite? Hagámonos una idea de cómo las matemáticas de Schrödinger guían a una onda de probabilidad cuando evoluciona en el tiempo.

Esto es bastante simple, porque el de la ecuación de Schrödinger es uno de los tipos más sencillos de ecuaciones matemáticas, caracterizado por una propiedad conocida como *linealidad* —una expresión matemática de que el todo es la suma de las partes—. Para ver lo que esto significa, imaginemos que la forma en la Figura 8.7a es la onda de probabilidad a mediodía para un electrón dado (por claridad, utilizaré una onda de probabilidad que depende de la localización en una dimensión representada por el eje horizontal, pero las ideas son generales). Podemos utilizar la ecuación de Schrödinger para seguir la evolución de esta onda hacia adelante en el tiempo, lo que da su forma a, digamos, la una de la tarde, ilustrada esquemáticamente en la Figura 8.7b. Notemos ahora lo siguiente. Usted puede descomponer la forma de onda inicial en la Figura 8.7a en dos partes más simples, como en la Figura 8.8a; si usted combina estas dos ondas en la figura, sumando sus valores punto a punto, recupera la forma de onda original. La linealidad de la ecuación de Schrödinger significa que usted puede utilizarla sobre cada parte en la Figura 8.8a por separado, lo que determina qué forma tendrá cada parte a la una de la tarde, y combinar luego los resultados como en la Figura 8.8b para recuperar el resultado completo mostrado en la Figura 8.7b. Y no hay nada sagrado en la descomposición en *dos* partes; usted puede dividir la forma inicial en cualquier número de partes, dejar evolucionar a

cada una de ellas por separado y combinar los resultados para obtener la forma de onda final.

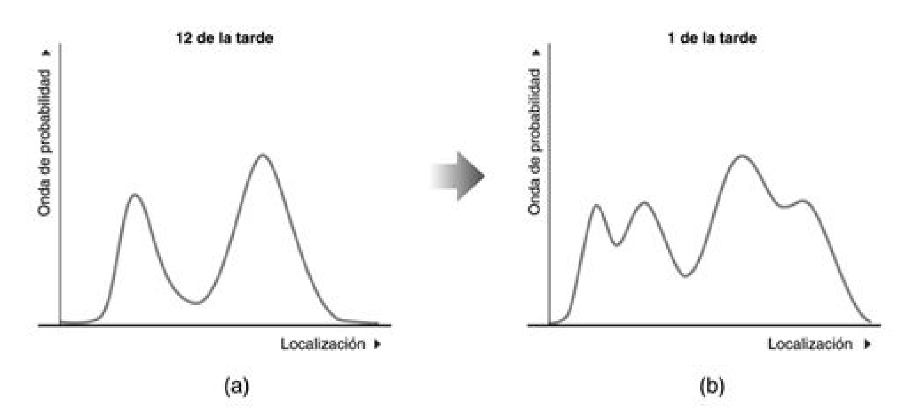


FIGURA 8.7. (a) La forma inicial de una onda de probabilidad en un instante evoluciona vía la ecuación de Schrödinger a una forma diferente (b) en un instante posterior.

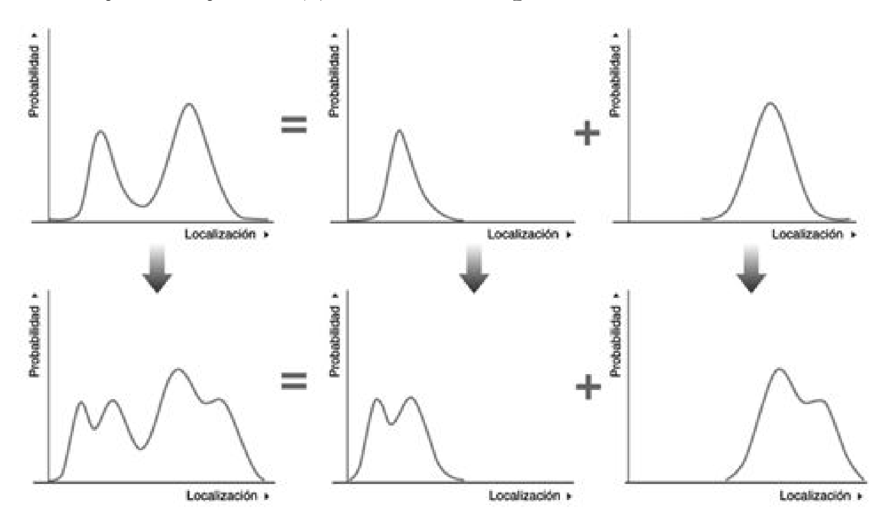


FIGURA 8.8. (a) La forma inicial de una onda de probabilidad puede descomponerse como la unión de dos formas más simples. (b) La evolución de la onda de probabilidad inicial puede reproducirse haciendo evolucionar las partes más simples y combinando los resultados.

Esto puede parecer un mero detalle técnico, pero la linealidad es una propiedad matemática extraordinariamente poderosa. Permite una estrategia divide-y-vencerás sumamente importante. Si una forma de onda inicial es complicada, usted es libre para dividirla en partes más sencillas y analizar cada una de ellas por separado. Al final, usted simplemente vuelve a juntar los resultados individuales. En realidad, ya hemos visto una aplicación importante de la linealidad en nuestro análisis del experimento de la doble rendija en la Figura 8.4. Para determinar cómo evoluciona la onda de probabilidad del electrón, dividimos la tarea: estudiamos cómo evoluciona la parte que atraviesa la rendija izquierda, estudiamos cómo evoluciona la parte que atraviesa la rendija derecha, y luego sumamos las dos ondas. Así es como encontramos la famosa figura de interferencia. Mire la pizarra de un teórico cuántico, y es esta misma aproximación la que verá subyacente tras muchas de las manipulaciones matemáticas.

Pero la linealidad no sólo hace tratables los cálculos cuánticos; está también en el corazón de los problemas de la teoría para explicar lo que sucede durante una medida. Esto se entiende mejor al aplicar la linealidad al propio acto de medida.

Imagine que usted es un experimentador que siente nostalgia de su infancia en Nueva York, y por ello está midiendo las posiciones de los electrones que inyecta en una maqueta de la ciudad. Usted empieza sus experimentos con un electrón cuya onda de probabilidad tiene una forma particularmente simple: es bonita y puntiaguda, como la de la Figura 8.9, lo que indica que con una probabilidad prácticamente del 100 por 100 el electrón está situado momentáneamente en la esquina de la calle 34 y Broadway—. (No se preocupe por cómo llegó a tener el electrón esta forma de onda; simplemente tómelo como algo dado.)[120] Si en ese mismo momento usted mide la posición del electrón con un buen aparato, el resultado debería ser preciso

—la lectura del aparato debería decir «calle 34 y Broadway». De hecho, si usted hace este experimento, eso es justo lo que sucede, como en la Figura 8.9.

Sería extraordinariamente complicado calcular cómo la ecuación de Schrödinger entrelaza la onda de probabilidad del electrón con la del billón de billones de átomos que constituyen el aparato de medida y persuade a una colección de estos últimos para disponerse en la pantalla de lectura en una configuración que diga «calle 34 y Broadway»; pero quien quiera que diseñó el aparato ha hecho el trabajo duro por nosotros. Ha sido construido de modo que su interacción con un electrón haga que la pantalla de lectura muestre la única posición definida donde el electrón está localizado en ese momento. Si el aparato hiciera alguna otra cosa en esta situación, sería prudente que lo cambiáramos por uno nuevo que funcione adecuadamente. Y, por supuesto, independientemente de los almacenes Macy, no hay nada especial en la calle 34 y Broadway; si hacemos el mismo experimento con la onda de probabilidad del electrón con un pico en el Hayden Planetarium cerca de la calle 81 y Central Park Oeste, o en el despacho de Bill Clinton en la 125 cerca de Lenox Avenue, la lectura del aparato daría estas localizaciones.



FIGURA 8.9. La onda de probabilidad de un electrón, en un instante dado, tiene un pico en la esquina de la calle 34 y Broadway. Una medida de la posición del electrón, en dicho instante, confirma que está localizado donde la onda tiene un pico.

Consideremos ahora una forma de onda ligeramente más complicada, como la de la Figura 8.10. Esta onda de probabilidad indica que, en el momento dado, hay dos lugares donde podría encontrarse el electrón: Strawberry Fields, el John Lennon Memorial en Central Park, y la tumba de Grant en Riverside Park. (El electrón se siente melancólico). Si medimos la posición del electrón pero, en contra de Bohr y en conformidad con los experimentos más refinados, suponemos que sigue aplicándose la ecuación de Schrödinger —al electrón, a las partículas en el aparato de medida, a cualquier cosa—, ¿qué dirá la lectura del aparato? La linealidad es la clave para la respuesta. Sabemos lo que sucede cuando medimos ondas puntiagudas individualmente. La ecuación de Schrödinger hace que la pantalla del aparato diga la localización del pico, como en la Figura 8.9. La linealidad nos dice entonces que para encontrar la respuesta

para dos picos, combinamos los resultados de medir cada pico por separado.

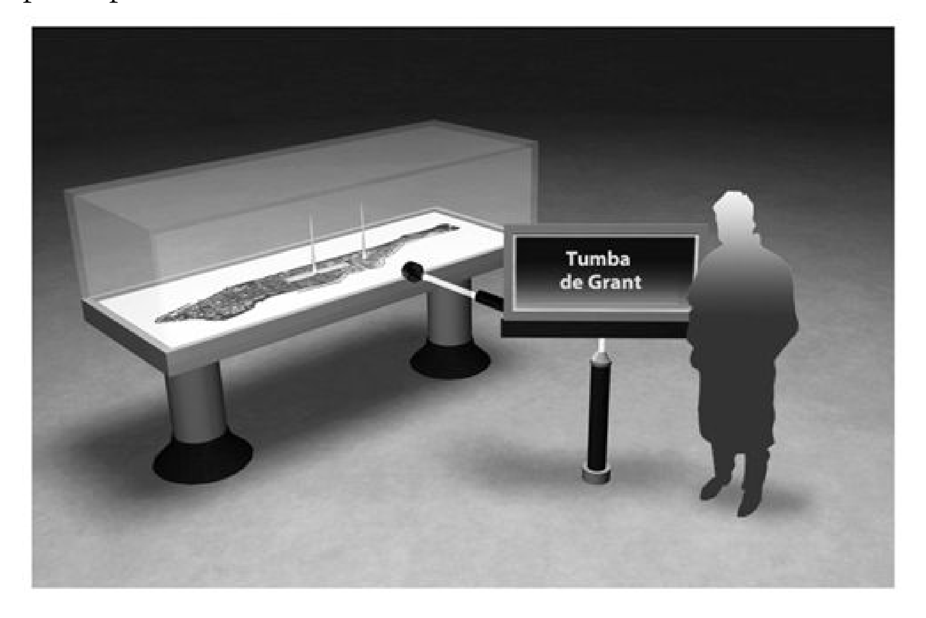


FIGURA 8.10. La onda de probabilidad de un electrón tiene picos en dos localizaciones. La linealidad de la ecuación de Schrödinger sugiere que una medida de la posición del electrón daría una amalgama confusa de ambas localizaciones.

Es aquí donde las cosas empiezan a hacerse raras. A primera vista, los resultados combinados sugieren que la pantalla debería registrar simultáneamente las localizaciones de ambos picos. Como en la Figura 8.10, las palabras «Strawberry Fields» y «tumba de Grant» deberían brillar simultáneamente, una localización mezclada con la otra, como el monitor confundido de un computador que está a punto de fallar. La ecuación de Schrödinger dicta también cómo las ondas de probabilidad de los fotones emitidos por la pantalla del aparato de medida se entrelazan con las de las partículas en los conos y bastones de sus ojos, y posteriormente las que corren por sus neuronas y crean un estado mental que refleja lo que usted ve. Suponiendo que la hegemonía de Schrödinger no tiene límites, la linealidad tam-

bién se aplica aquí, de modo que el aparato no sólo mostrará simultáneamente ambas localizaciones, sino que su cerebro también quedará presa de la confusión, pensando que el electrón está situado simultáneamente en ambas.

Para formas de onda aún más complicadas, la confusión se hace mucho mayor. Una forma con cuatro picos duplica el desconcierto. Con seis, lo triplica. Advierta que si continúa así, poniendo picos de onda de varias alturas en cada localización en la maqueta de Manhattan, su forma combinada llena una forma de onda cuántica ordinaria que varía de forma gradual, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 8.11. La linealidad sigue siendo válida, y esto implica que la lectura final del aparato, así como el estado final de su cerebro y su impresión final, están dictados por la unión de los resultados para cada pico por separado. El aparato debería registrar simultáneamente la localización de todos y cada uno de los picos —todas y cada una de las localizaciones en Manhattan—, mientras su mente queda profundamente desconcertada, incapaz de fijar una única localización definida para el electrón.[121]

Pero, por supuesto, esto parece totalmente contrario a la experiencia. Ningún aparato que funcione adecuadamente muestra resultados contradictorios cuando se hace una medida. Ninguna persona en plenitud de sus facultades, que realiza una medida, tiene la impresión mental de una mezcla emborronada de resultados simultáneos pero distintos.



FIGURA 8.11. Una onda de probabilidad general es la unión de muchas ondas puntiagudas, cada una de las cuales representa una posición posible del electrón.

Ahora puede ver usted el atractivo de la receta de Bohr. Seguir con la biodramina, habría declarado él. Según Bohr, no vemos lecturas ambiguas porque no ocurren. Él habría argumentado que llegamos a una conclusión incorrecta porque hemos extrapolado el alcance de la ecuación de Schrödinger al dominio de las cosas grandes: equipos de laboratorio que toman medidas y científicos que leen los resultados. Aunque la ecuación de Schrödinger y su propiedad de linealidad dictan que deberíamos combinar los resultados de distintos resultados posibles —nada colapsa—, Bohr nos dice que esto es falso porque el acto de medida echa por la ventana a las matemáticas de Schrödinger. En su lugar, diría él, la medida hace que todos menos uno de los picos en la Figura 8.10 o en la Figura 8.11 colapsan a cero; la probabilidad de que un pico particular sea el único superviviente es proporcional a la altura del pico. Ese único pi-

co remanente determina la lectura única del aparato, así como el reconocimiento de un único resultado por parte de su mente. ¡Se acabó el desconcierto!

Pero para Everett, y más tarde DeWitt, el coste de la aproximación de Bohr era demasiado alto. Se supone que la ecuación de Schrödinger describe partículas. Todas las partículas. ¿Por qué no se aplicaría a configuraciones especiales de partículas —las que constituyen el equipamiento que toma medidas, y las del experimentador que controla el equipamiento?—. Sencillamente no tiene sentido. Por consiguiente, Everett sugería que no deberíamos prescindir tan rápidamente de la ecuación de Schrödinger. En su lugar, él defendía que analicemos dónde nos lleva la ecuación de Schrödinger desde una perspectiva decididamente diferente.

Muchos mundos

La dificultad que hemos encontrado es que resulta desconcertante pensar que un aparato de medida o una mente experimentan simultáneamente realidades distintas. Podemos tener posiciones contrarias sobre esta o aquella cuestión, emociones encontradas con respecto a esta o aquella persona, pero cuando se llega a los hechos que constituyen la realidad, todo lo que sabemos testimonia la existencia de una descripción objetiva e inequívoca. Todo lo que sabemos testimonia que un aparato y una medida darán una lectura; una lectura y una mente darán una impresión mental.

La idea de Everett era que las matemáticas de Schrödinger, el corazón de la mecánica cuántica, son compatibles con estas experiencias básicas. La fuente de la supuesta ambigüedad en las

lecturas del aparato y en las impresiones mentales es la manera en que hemos aplicado las matemáticas, es decir, la manera en la que hemos combinado los resultados de las medidas que se ilustra en la Figura 8.10 y la Figura 8.11. Pensemos en ello.

Cuando usted mide una onda con un único pico, tal como la de la Figura 8.9, el aparato registra la localización del pico. Si el pico está en Strawberry Fields, eso es lo que lee el aparato; si usted mira el resultado, su cerebro registra esa localización y usted será consciente de ello. Si el pico está en la tumba de Grant, eso es lo que registra el aparato; si usted mira, su cerebro registra esa localización y usted se hace consciente de ello. Cuando usted mide la onda con doble pico en la Figura 8.10, las matemáticas de Schrödinger le dicen que combine los dos resultados que acaba de encontrar. Pero, dice Everett, sea cuidadoso y preciso cuando los combina. El resultado combinado, argumentaba, no da un medidor y una mente que registran simultáneamente las dos localizaciones. Ése es un pensamiento negligente.

En su lugar, procediendo lenta y literalmente, encontramos que el resultado combinado es un aparato y una mente que registran Strawberry Fields, y un aparato y una mente que registran tumba de Grant. ¿Y qué significa eso? Utilizaré grandes pinceladas para pintar la imagen general, que refinaré inmediatamente. Para acomodar el resultado sugerido de Everett, el aparato y usted y todo lo demás deben desdoblarse en la medida, dando dos aparatos, dos usted, y dos todo lo demás; la única diferencia entre los dos es que un aparato y un usted registra Strawberry Fields, mientras que el otro aparato y el otro usted registra tumba de Grant. Como en la Figura 8.12, esto implica que ahora tenemos dos realidades paralelas. Para los usted que ocupan cada una de ellas, la medida y su impresión mental del resultado son precisas y únicas, y con ello sienten la vida como

es habitual. Por supuesto, la peculiaridad es que hay dos usted que sienten de esta manera.

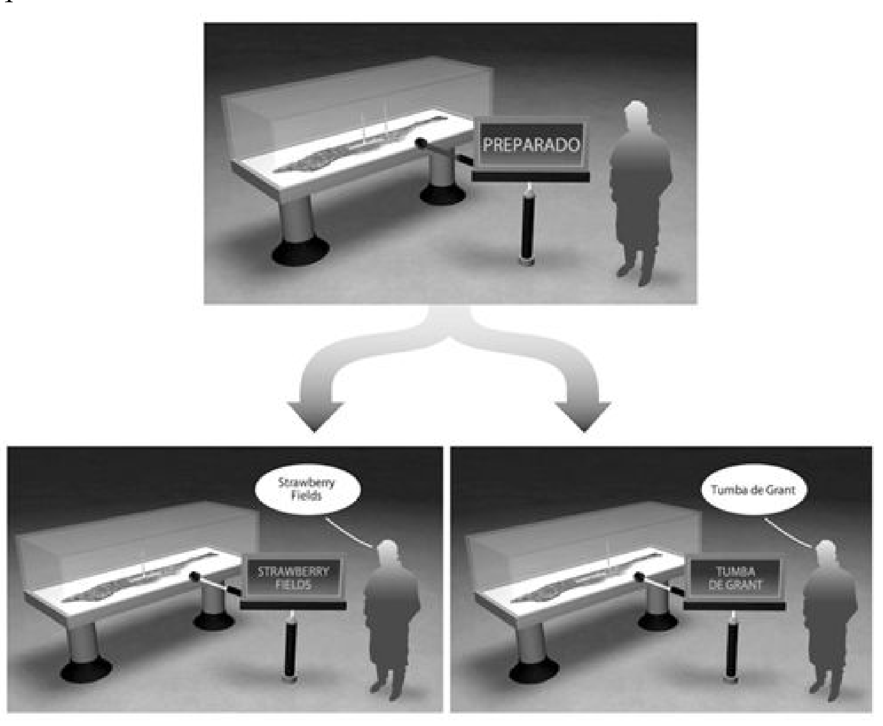


FIGURA 8.12. En la aproximación de Everett, la medida de una partícula cuya onda de probabilidad tiene dos picos da ambos resultados. En un mundo, la partícula es encontrada en la primera localización; en otro mundo, es encontrada en la segunda.

Para mantener accesible la discusión, me he centrado en la medida de la posición de una única partícula, que además tiene una onda de probabilidad particularmente simple. Pero la propuesta de Everett se aplica con toda generalidad. Si usted midiera la posición de una partícula cuya onda de probabilidad tiene cualquier número de picos, digamos cinco, el resultado, según Everett, serían cinco realidades paralelas que difieren sólo en la localización registrada en cada aparato de la realidad, y dentro de la mente de cada usted de la realidad. Si uno de estos usted midiera luego la posición de otra partícula cuya onda tu-

viera siete picos, ese usted y ese mundo se dividirían de nuevo en otros siete, uno por cada resultado posible. Y si usted midiera una onda como la de la Figura 8.11, que puede descomponerse en muchísimos picos muy apretados, el resultado sería muchísimas realidades paralelas en las que cada posible localización de la partícula sería registrada en un aparato y leída por una copia de usted. En la aproximación de Everett, todo lo que es *posible*, mecano-cuánticamente hablando (es decir, todos esos resultados a los que la mecánica cuántica asigna una probabilidad no nula), se *realiza* en su propio mundo separado. Éstos son los «muchos mundos» de la aproximación de los *muchos mundos* a la mecánica cuántica.

Si aplicamos la terminología que hemos estado utilizando en capítulos anteriores, estos muchos mundos serían descritos adecuadamente como muchos universos, lo que compone un universo, el sexto que hemos encontrado. Yo lo llamo el *multiverso cuántico*.

Una historia de dos historias

Al describir cómo la mecánica cuántica puede generar muchas realidades, utilicé la palabra «desdoblar». Everett la utilizaba. También lo hacía DeWitt. Sin embargo, en este contexto es un término que puede llevar a confusión, y yo me había propuesto no acudir a él. Pero cedí a la tentación. En mi defensa diré que a veces es más efectivo utilizar un martillo pilón para derribar una barrera que nos separa de una propuesta poco familiar acerca del funcionamiento de la realidad, y reparar posteriormente el daño que esto produce, que abrir delicadamente una limpia ventana que muestra directamente la nueva vista. Yo

he estado utilizando el martillo pilón; en esta sección y en la próxima haré las necesarias reparaciones. Algunas de las ideas son algo más difíciles que las que hemos encontrado hasta ahora, y las cadenas explicatorias también son más largas, pero le animo a que siga conmigo. He encontrado que con demasiada frecuencia las personas que aprenden la idea de los muchos mundos, o que incluso están algo más familiarizadas con ella, tienen la impresión de que fue producto de una especulación del tipo más extravagante. Pero nada podía estar más lejos de la verdad. Como explicaré, la aproximación de los muchos mundos es, de alguna manera, el marco más conservador para definir la física cuántica, y es importante entender por qué.

El punto esencial es que los físicos siempre deben contar dos tipos de historias. Una es la historia matemática que cuenta cómo evoluciona el universo según una teoría dada. La otra, también esencial, es la historia física, que traduce las matemáticas abstractas al lenguaje de la experiencia. Esta segunda historia describe cómo se presentará la evolución matemática para observadores como usted y como yo, y en general, qué nos dicen los símbolos matemáticos de la teoría sobre la naturaleza de la realidad.[122] En la época de Newton las dos historias eran esencialmente idénticas, como sugerí con mis comentarios en el capítulo 7 acerca de que la «arquitectura» de Newton era inmediata y palpable. Cada símbolo matemático en las ecuaciones de Newton tiene un correlato físico directo y transparente. ¿El símbolo *x*? ¡Ah!, eso es la posición de la bola. ¿Y el símbolo *v*? Es la velocidad de la bola. Sin embargo, una vez que tenemos la mecánica cuántica, la traducción entre símbolos matemáticos y lo que podemos ver en el mundo que nos rodea se hace más sutil. A su vez, el lenguaje utilizado y los conceptos considerados relevantes para cada una de las dos historias se hacen tan diferentes que usted necesita ambos para obtener una comprensión completa. Pero es importante distinguir ambas histo-

rias: entender plenamente qué ideas y descripciones son invocadas como parte de la estructura matemática fundamental de la teoría y cuáles son utilizadas para tender un puente con la experiencia humana.

Narremos las dos historias de la aproximación de los muchos mundos a la mecánica cuántica. Ésta es la primera.

Las matemáticas de los muchos mundos, a diferencia de las de Copenhague, son puras, simples y constantes. La ecuación de Schrödinger determina cómo evolucionan en el tiempo las ondas de probabilidad, y nunca se quedan al margen; *siempre* están en acción. Las matemáticas de Schrödinger guían la forma de las ondas de probabilidad, haciéndolas cambiar, transformarse y ondular con el tiempo. Ya esté abordando la onda de probabilidad para una partícula, o para una colección de partículas, o para los diversos ensamblajes de partículas que le constituyen a usted y a su equipo de medida, la ecuación de Schrödinger toma como dato de partida la forma inicial de la onda de probabilidad de las partículas, y luego, como el programa gráfico de un elaborado salvapantallas, proporciona como resultado la forma de la onda en cualquier instante futuro. Y así es como, según esta aproximación, evoluciona el universo. Punto final. Fin de la historia. O, más exactamente, fin de la primera historia.

Nótese que al narrar la primera historia no necesité la palabra «desdoblar» ni los términos «muchos mundos», «universos paralelos» o «multiverso cuántico». La aproximación de los muchos mundos no plantea estas características como hipótesis. Ellas no desempeñan ningún papel en la estructura matemática fundamental de la teoría. Más bien, como veremos, estas ideas son invocadas en la segunda historia de la teoría, cuando, siguiendo a Everett u otros que desde entonces han ampliado su trabajo pionero, investigamos lo que nos dicen las matemáticas sobre nuestras observaciones y medidas.

Empecemos de manera sencilla —o tan sencilla como podamos—. Consideremos que se mide un electrón que tiene una onda de probabilidad puntiaguda, como en la Figura 8.9. (Una vez más, no se preocupe por cómo se llegó a esta forma de onda; tómela como dada). Como ya se ha señalado, contar en detalle siquiera la primera historia de este proceso de medida está más allá de nuestras posibilidades. Habríamos tenido que utilizar las matemáticas de Schrödinger para imaginar cómo la onda de probabilidad que describe las posiciones del enorme número de partículas que le constituyen a usted y su aparato de medida se une a la onda de probabilidad del electrón, y cómo su unión evoluciona hacia adelante en el tiempo. A mis estudiantes de grado, muchos de los cuales son bastante capaces, les cuesta resolver la ecuación de Schrödinger para una simple partícula. Entre usted y el aparato hay del orden de 10^{27} partículas. Desarrollar las matemáticas de Schrödinger para tantos constituyentes es prácticamente imposible. Incluso así, entendemos cualitativamente lo que implican las matemáticas. Cuando medimos la posición del electrón, provocamos una masiva migración de partículas. Unas 10^{24} partículas en la pantalla del aparato, como los ejecutantes en un espectáculo bien coreografiado, corren al punto adecuado para escribir colectivamente «calle 34 y Broadway», mientras que un número similar de partículas en mis ojos y mi cerebro hacen lo necesario para que yo desarrolle una firme percepción mental del resultado. Las matemáticas de Schrödinger —por impenetrable que pueda ser un análisis explícito cuando nos enfrentamos a tantas partículas— describen ese desplazamiento de partículas.

Visualizar esta transformación en el nivel de una onda de probabilidad está también más allá de nuestro alcance. En la Figura 8.9 y las demás en esta secuencia utilicé dos ejes, la red de calles norte-sur y este-oeste de nuestra maqueta de Manhattan, para denotar las posibles posiciones de una única partícula. El

valor de la onda de probabilidad en cada localización se denotaba por la altura de la onda. Esto ya simplifica las cosas porque dejé fuera el tercer eje, la posición vertical de la partícula (ya esté en el segundo piso de Macy, o en el quinto). Incluir el eje vertical hubiera sido complicado, porque si lo hubiera utilizado para denotar la posición, no me habría quedado un eje para registrar el tamaño de la onda. Tales son las limitaciones de un cerebro y un sistema visual que la evolución ha enraizado firmemente en las tres dimensiones espaciales. Para visualizar adecuadamente la onda de probabilidad para aproximadamente 10^{27} partículas habría tenido que incluir tres ejes por cada una de ellas, lo que me permitiría dar cuenta matemáticamente de todas las posiciones posibles que podría ocupar cada partícula. [123] Añadir siquiera un único eje vertical a la Figura 8.9 lo habría hecho difícil de visualizar; sería estúpido pensar en añadir mil billones de billones.

Pero una imagen mental de las ideas clave es importante; así que, por imperfecto que sea el resultado, intentémoslo. Al esbozar la onda de probabilidad para las partículas que le constituyen a usted y su aparato, aceptaré el límite de dos ejes en una página plana pero utilizaré una interpretación no convencional de lo que los ejes significan. Hablando en términos generales, pensaré que cada eje comprende un enorme haz de ejes, estrechamente agrupados, que simbólicamente delinearán las posiciones posibles de un número igualmente enorme de partículas. Por consiguiente, una onda dibujada utilizando estos haces de ejes mostraría las probabilidades para las posiciones de un enorme grupo de partículas. Para resaltar la distinción entre las situaciones de muchas partículas y única partícula, utilizaré un contorno brillante para la onda de probabilidad de muchas partículas, como en la Figura 8.13.

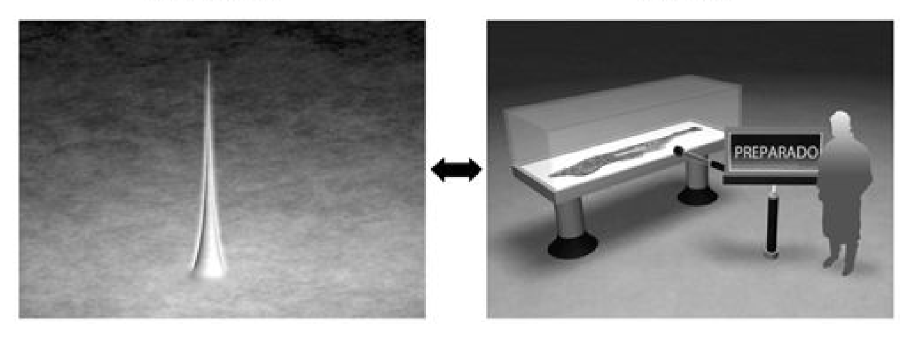


FIGURA 8.13. Una representación esquemática de la onda de probabilidad combinada para todas las partículas que le constituyen a usted y su aparato de medida.

Las ilustraciones para muchas partículas y una partícula tienen algunas características en común. Así como la forma de onda puntiaguda en la Figura 8.6 indica probabilidades que están fuertemente sesgadas (siendo de casi un 100 por 100 en la posición de la punta y de casi un 0 por 100 en cualquier otro lugar), también la onda puntiaguda de la Figura 8.13 denota probabilidades fuertemente sesgadas. Pero usted tiene que ser cuidadoso, porque una comprensión basada en ilustraciones de una única partícula sólo puede llevarle hasta aquí. Por ejemplo, basados en la Figura 8.6 es natural pensar que la Figura 8.13 representa partículas que están amontonadas en torno a la misma localización. Pero eso no es cierto. La forma puntiaguda en la Figura 8.13 simboliza que cada una de las partículas que le constituyen a usted y cada una de las partículas que constituyen el aparato parten del estado familiar y ordinario de tener una posición que está prácticamente definida en un 100 por 100. Pero no todas están situadas en la misma localización. Las partículas que constituyen su mano, hombro y cerebro están, casi con certeza, amontonadas dentro de la localización de su mano, hombro y cerebro; las partículas que constituyen el aparato de medida están, casi con certeza, acumuladas dentro de la localización del aparato. La forma de onda puntiaguda en la Figu-

ra 8.13 denota que cada una de estas partículas tiene tan solo una remotísima probabilidad de ser encontrada en otro lugar.

Si usted realiza ahora la medida ilustrada en la Figura 8.14, la onda de probabilidad de muchas partículas (para las partículas dentro de usted y el aparato) evoluciona en virtud de la interacción con el electrón como se ilustra esquemáticamente en la Figura 8.14a). Todas las partículas implicadas siguen teniendo posiciones prácticamente definidas (dentro de usted; dentro del aparato), y ésa es la razón por la que la onda en la Figura 8.14a mantiene una forma puntiaguda. Pero se produce una reordenación masiva de partículas que da como resultado que las palabras «Strawberry Fields» se formen en la lectura del aparato y también en su cerebro (como en la Figura 8.14b). La Figura 8.14a representa la transformación matemática dictada por la ecuación de Schrödinger, el primer tipo de historia. La Figura 8.14b ilustra la descripción física de dicha evolución matemática, el segundo tipo de historia. Del mismo modo, si realizamos el experimento de la Figura 8.15, un cambio análogo tiene lugar en la onda (Figura 8.15a). Este cambio corresponde a un masivo reordenamiento de partículas que muestra «tumba de Grant» en la pantalla y genera dentro de usted la impresión mental asociada (Figura 8.15b).

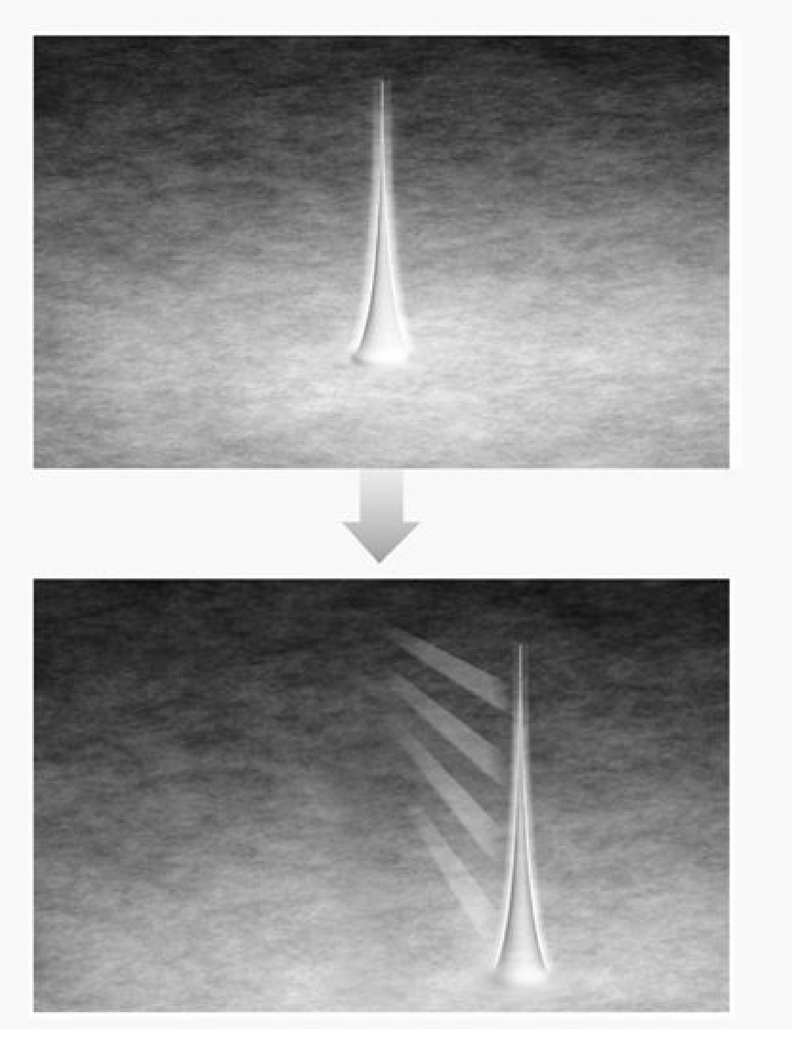


FIGURA 8.14. (a) Una ilustración esquemática de la evolución, dictada por la ecuación de Schrödinger, de la onda de probabilidad combinada para todas las partículas que le constituyen a usted y su aparato de medida, cuando usted mide la posición de un electrón. La propia onda de probabilidad del electrón tiene un pico en Strawberry Fields.

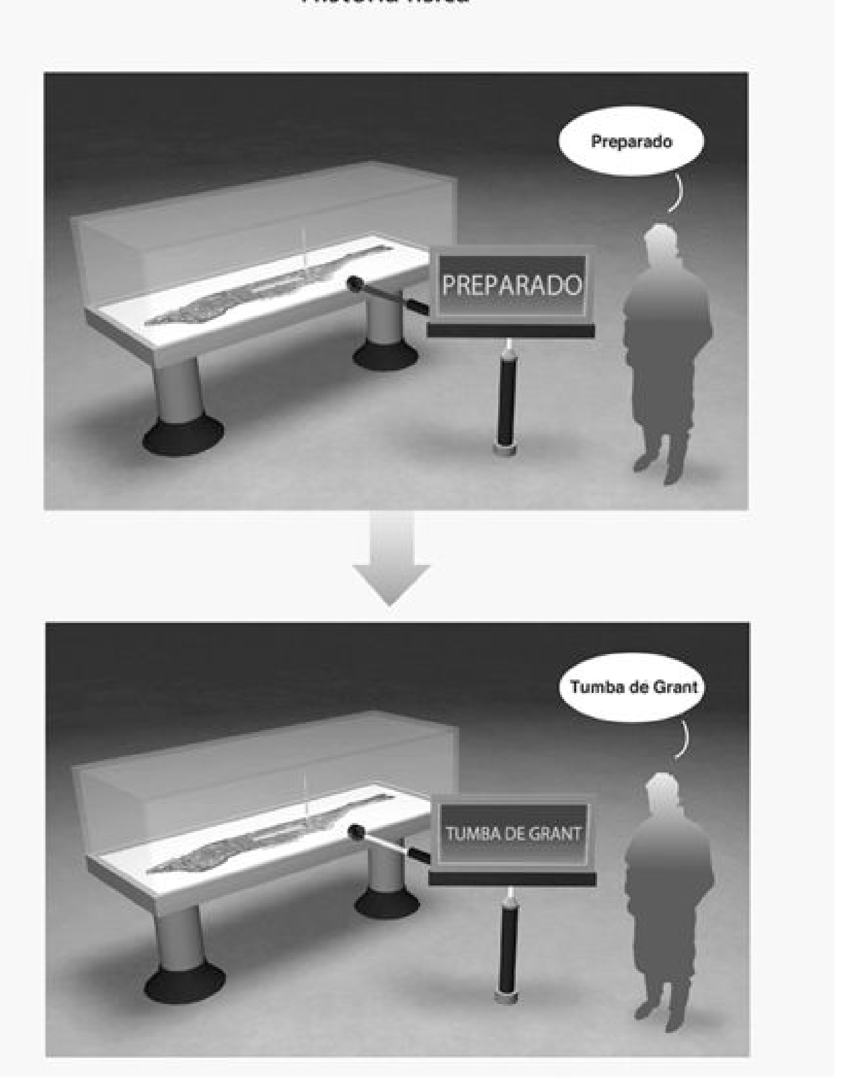


FIGURA 8.14. (b) La correspondiente historia física, o experimental.

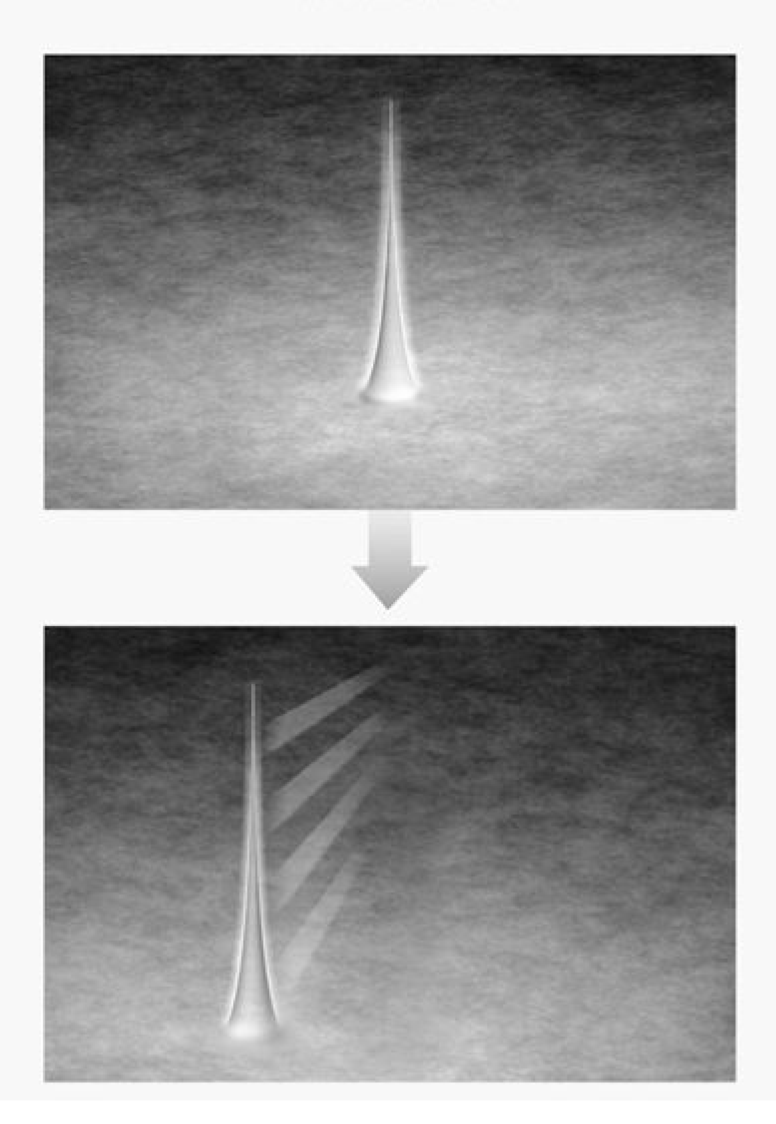


FIGURA 8.15. (a) El mismo tipo de evolución matemática que en la Figura 8.14a, pero con la onda de probabilidad del electrón con el pico en la tumba de Grant.

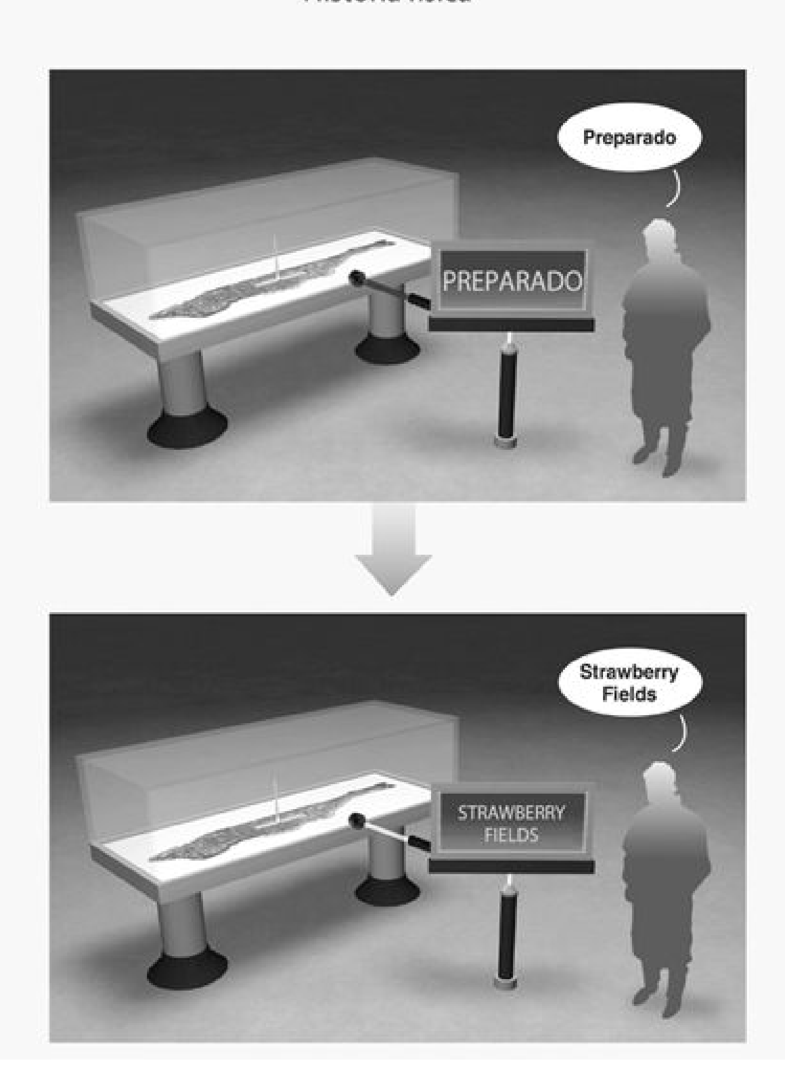


FIGURA 8.15. (b) La correspondiente historia física, o experimental.

Ahora utilizamos la linealidad para unir las dos. Si usted mide la posición de un electrón cuya onda de probabilidad tiene picos en dos localizaciones, la onda de probabilidad para usted y su aparato se mezcla con la del electrón, lo que da como re-

sultado la evolución mostrada en la Figura 8.16a —la combinación de las evoluciones mostradas en la Figura 8.14a y la Figura 8.15a—. Hasta aquí, esto no es otra cosa que una versión ilustrada y anotada del primer tipo de historia cuántica. Empezamos con una onda de probabilidad de una forma dada, la ecuación de Schrödinger la hace evolucionar hacia adelante en el tiempo, y terminamos con una onda de probabilidad de una nueva forma. Pero los detalles con que la hemos revestido ahora nos cuentan esta historia matemática en el lenguaje más cualitativo de una historia de tipo dos.

Físicamente, cada pico en la Figura 8.16a representa una configuración de un enorme número de partículas que da como resultado que el aparato dé una lectura concreta y su mente adquiera esa información. En el pico izquierdo, la lectura es Strawberry Fields; en el derecho, es tumba de Grant. Salvo esa diferencia, nada distingue un pico de otro. Hago hincapié en esto porque es esencial para darse cuenta de que ninguna de ellas es más real que la otra. Nada que no sea la lectura particular del aparato, y su lectura de la lectura, distingue los dos picos de la onda multipartícula.

Lo que significa que nuestra historia de tipo dos, como se ilustra en la Figura 8.16b, incluye dos realidades.

Historia matemática

FIGURA 8.16. (a) Una ilustración esquemática de la evolución de la onda de probabilidad combinada de todas las partículas que le constituyen a usted y su aparato de medida, cuando se mide la posición de un electrón cuya onda de probabilidad tiene picos en dos localizaciones.

De hecho, centrarnos en el aparato y en su mente es meramente otra simplificación. También podría haber incluido las partículas que constituyen el laboratorio y todo lo que hay allí, así como las de la Tierra, el Sol y todo lo demás, y toda la discusión hubiera sido igual, al pie de la letra. La única diferencia hubiera sido que la onda de probabilidad brillante en la Figura 8.16a tendría ahora también la información sobre todas las demás partículas. Pero puesto que la medida que estamos discutiendo no tiene ningún impacto esencial sobre ellas, eso no hubiera aportado nada especial. No obstante, es útil introducir estas partículas porque ahora nuestra segunda historia puede ampliarse para incluir no sólo una copia de usted examinando un aparato que está haciendo una medida, sino también copias del laboratorio que le rodea, el resto de la Tierra en órbita alrededor del Sol, y todo lo demás. Esto significa que cada pico, en el lenguaje de la segunda historia, corresponde a lo que tradicionalmente habríamos calificado de universo *bona fide*. En uno de estos universos usted puede ver «Strawberry Fields» en la lectura de la pantalla; en el otro, «tumba de Grant».

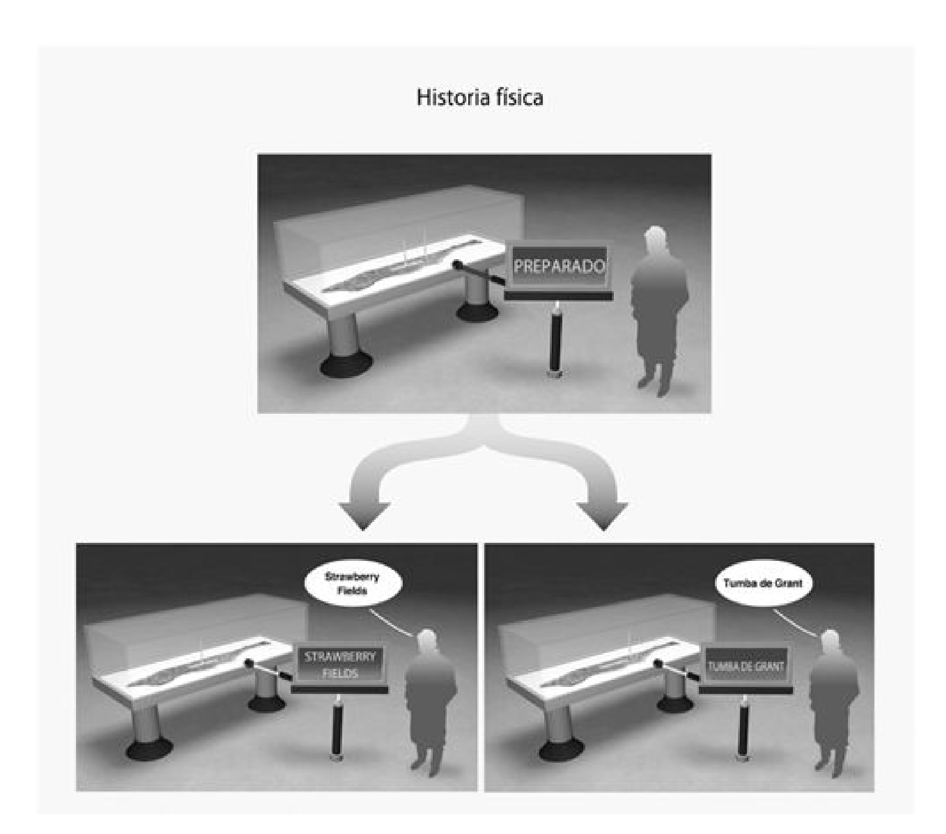


FIGURA 8.16. (b) La correspondiente historia física, o experimental.

Si la onda de probabilidad original del electrón tuviera, digamos, cuatro picos, o cinco, o un centenar, o cualquier número, lo mismo se seguiría: la evolución de la onda daría como resultado cuatro, o cinco, o un centenar, o cualquier número de universos. En el caso más general, como en la Figura 8.11, una onda extendida se compone de picos en todas las localizaciones, y por ello la evolución de la onda daría una inmensa colección de universos, uno por cada posición posible.[124]

No obstante, como ya se ha advertido, lo único que sucede en cualquiera de estos escenarios es que una onda de probabilidad entra en la ecuación de Schrödinger, sus matemáticas se ponen en marcha y sale una onda con una forma modificada. No hay ninguna «máquina de clonar». No hay ninguna «máqui-

na de desdoblar». Por eso es por lo que dije antes que tales palabras pueden dar una impresión engañosa. No hay otra cosa que una «máquina» de evolución-de-onda-de-probabilidad impulsada por la eficiente ley matemática de la mecánica cuántica. Cuando las ondas resultantes tienen una forma particular, como en la Figura 8.16a, volvemos a narrar la historia matemática en lenguaje de tipo dos, y concluimos que en cada pico hay un ser sintiente, situado dentro de un universo de apariencia normal, que ve uno y sólo un resultado definido para el experimento dado, como en la Figura 8.16b. Si yo pudiera entrevistar a todos estos seres sintientes, encontraría que cada uno de ellos es una réplica exacta de los otros. Sólo se diferenciarían en que cada uno de ellos sería testigo de un resultado diferente.

Y así, mientras Bohr y el grupo de Copenhague argumentaban que sólo existía uno de estos universos (porque el acto de medida, que según ellos está fuera del alcance de Schrödinger, colapsaba todos los demás), y mientras que un primer intento de ir más allá de Bohr y extender las matemáticas de Schrödinger a todas las partículas, incluidas las que constituyen aparatos y cerebros, producía un desconcierto (porque una máquina o mente dada parecía interiorizar simultáneamente todos los resultados), Everett encontró que una lectura más cuidadosa de las matemáticas de Schrödinger lleva a otro lugar: a una pletórica realidad poblada por una colección siempre creciente de universos.

Antes de la publicación del artículo de Everett en 1957, una versión preliminar había circulado entre varios físicos de todo el mundo. Bajo la guía de Wheeler, la redacción del artículo se había abreviado de una forma tan agresiva que muchos de los que lo leyeron no estaban seguros de si Everett estaba argumentando que todos los universos en las matemáticas eran reales. Everett se hizo consciente de esta confusión y decidió aclararla. En una «nota añadida en pruebas» que parece haber in-

troducido de pasada inmediatamente antes de la publicación, y aparentemente sin que lo supiera Wheeler, Everett expresaba nítidamente su posición sobre la realidad de los diferentes resultados: «Desde el punto de vista de la teoría, todos… "se realizan", ninguno es más "real" que el resto».[125]

¿Cuándo un universo es una alternativa?

Además de las palabras cargadas «desdoblar» y «clonar», hemos utilizado libremente otros dos grandes términos en nuestras historias de tipo dos: «mundo» e, intercambiablemente en este contexto, «universo». ¿Hay reglas generales para determinar cuándo es apropiado este uso? Cuando consideramos una onda de probabilidad para un único electrón con dos (o más) picos, no hablamos de dos (o más) mundos. Más bien, hablamos de un mundo —el nuestro— que contiene un electrón cuya posición es ambigua. Pero, en la aproximación de Everett, cuando medimos u observamos el electrón, hablamos en términos de mundos múltiples. ¿Qué es lo que distingue la partícula no medida y la medida, y da descripciones que suenan tan radicalmente diferentes?

Una respuesta rápida es que en el caso de un único electrón aislado no contamos una historia de tipo dos, porque sin una medida o una observación no hay vínculo con la experiencia humana que necesite articulación. Todo lo que se necesita es la historia de tipo uno de una onda de probabilidad que evoluciona siguiendo las matemáticas de Schrödinger. Y sin una historia de tipo dos, no hay oportunidad de invocar realidades múltiples. Aunque esta explicación es adecuada, vale la pena profundizar un poco más, lo que revela una característica especial de

las ondas cuánticas que entra en juego cuanto están implicadas muchas partículas.

Para captar la idea esencial es más fácil volver al experimento de la doble rendija de las figuras 8.2 y 8.4. Recordemos que la onda de probabilidad de un electrón llega a la barrera y dos fragmentos de onda atraviesan las rendijas y viajan hacia la pantalla detectora. Inspirado por nuestra discusión de los muchos mundos, usted podría estar tentado a pensar que las dos ondas que avanzan representan dos realidades separadas. En una, un electrón pasa por la rendija izquierda; en la otra, un electrón pasa por la rendija derecha. Pero usted comprende que el entremezclado de estas supuestamente «realidades distintas» afecta profundamente al resultado del experimento; el entremezclado es lo que produce una figura de interferencia. De modo que no tiene mucho sentido, ni ofrece ninguna intuición especial, considerar que las dos trayectorias de las ondas existen en universos separados.

Sin embargo, si modificamos el experimento colocando un medidor detrás de cada rendija que registra si un electrón la atraviesa o no, la situación es radicalmente diferente. Puesto que el equipamiento macroscópico está ahora incluido, las dos trayectorias distintas de un electrón generan diferencias en un número enorme de partículas —el número enorme de partículas en la pantalla del medidor que registra «electrón atravesó la rendija izquierda» o «electrón atravesó la rendija derecha»—. Y por esto, las respectivas ondas de probabilidad para cada posibilidad se hacen tan dispares que es prácticamente imposible que una tenga ninguna influencia posterior sobre la otra. Igual que en la Figura 8.16a, las diferencias entre los trillones y trillones de partículas en los medidores hacen que las ondas para los dos resultados se alejen una de otra, lo que deja un solapamiento despreciable. Sin solapamiento, las ondas no participan en ninguno de los fenómenos de interferencia que son el sello de

la mecánica cuántica. De hecho, colocados los medidores, los electrones ya no dan la imagen con franjas de la Figura 8.2c; en su lugar, generan una simple amalgama de los resultados de la Figura 8.2a y la Figura 8.2b. Los físicos dicen que las ondas de probabilidad han sufrido *decoherencia* (algo sobre lo que usted puede leer con más detalle; por ejemplo, el capítulo 7 de *El tejido del cosmos*).

La idea, entonces, es que una vez que entra en juego la decoherencia, las ondas para cada resultado evolucionan de forma independiente —no hay entremezclado entre los distintos resultados posibles—, y cada uno puede así ser llamado un mundo o un universo por sí mismo. Para el caso que nos ocupa, en uno de estos universos el electrón atraviesa la rendija izquierda, y el medidor muestra izquierda; en otro universo el electrón atraviesa la rendija derecha, y el medidor registra derecha.

En este sentido, y sólo en este sentido, hay resonancia con Bohr. Según la aproximación de los muchos mundos, los objetos grandes hechos de muchas partículas difieren de los objetos pequeños hechos de una partícula o un puñado de ellas. Los objetos grandes no están fuera de la ley matemática básica de la mecánica cuántica, como pensaba Bohr, pero permiten que las ondas de probabilidad adquieran suficientes variaciones para que se haga despreciable su capacidad de interferir entre sí. Y una vez que dos o más ondas no pueden afectarse unas a otras, se hacen mutuamente invisibles; cada una «piensa» que las otras han desaparecido. Así, mientras que Bohr hacía desaparecer por decreto todos los resultados menos uno de una medida, la aproximación de los muchos mundos, combinada con la decoherencia, asegura que dentro de cada universo *parece* que los otros resultados hubieran desaparecido. Es decir, dentro de cada universo es *como si* la onda de probabilidad hubiera colapsado. Pero, comparado con la aproximación de Copenhague, el «como si» proporciona una imagen muy diferente de la exten-

sión de la realidad. En la visión de los muchos mundos se realizan todos los resultados, y no sólo uno.

Incertidumbre en el filo

Podría parecer que éste es un buen lugar para poner fin al capítulo. Hemos visto cómo el esqueleto de la estructura matemática de la mecánica cuántica nos lleva a una nueva concepción de los universos paralelos. Pero usted advertirá que aún le queda camino a este capítulo. En esas páginas explicaré por qué la aproximación de los muchos mundos a la mecánica cuántica sigue siendo controvertida; veremos que la resistencia va mucho más allá de la náusea que algunos sienten ante el salto conceptual a una perspectiva tan poco familiar de la realidad. Pero por si usted ha llegado a la saturación y se siente impulsado a pasar al capítulo siguiente, he aquí un breve resumen.

En el día a día, la probabilidad entra en nuestro pensamiento cuando nos enfrentamos a un abanico de resultados posibles pero, por una razón u otra, somos incapaces de descubrir qué sucederá realmente. A veces tenemos información suficiente para determinar qué resultados tienen una probabilidad mayor o menor de ocurrir, y la probabilidad es la herramienta que hace cuantitativas estas ideas. Nuestra confianza en una aproximación probabilista crece cuando encontramos que los resultados que se estiman como probables suceden con frecuencia y los estimados poco probables raramente ocurren. El reto al que se enfrenta la aproximación de los muchos mundos es que necesita dar sentido a la probabilidad —las predicciones probabilistas de la mecánica cuántica— en un contexto completamente diferente, un contexto que imagina que suceden *todos* los resul-

tados posibles. El dilema tiene un enunciado simple: ¿cómo podemos hablar de que unos resultados sean probables y otros sean poco probables cuando todos tienen lugar?

En las secciones restantes explicaré la cuestión con más detalle y discutiré los intentos de abordarlas. Tengamos cuidado: ahora estamos en el filo de la investigación, de modo que hay una amplia variedad de opiniones acerca de dónde estamos actualmente.

Un problema probable

Una crítica frecuente a la aproximación de los muchos mundos es que es demasiado barroca para ser cierta. La historia de la física nos enseña que las teorías exitosas son simples y elegantes; explican los datos con un mínimo de hipótesis y ofrecen una comprensión que es precisa y económica. Una teoría que introduce una plétora de universos siempre creciente no se acerca mucho a este ideal.

Los proponentes de la aproximación de los muchos mundos argumentan, de forma plausible, que al evaluar la complejidad de una propuesta científica no habría que centrarse en sus *implicaciones*. Lo que importa son las características fundamentales de la propia propuesta. La aproximación de los muchos mundos supone que una única ecuación —la de Schrödinger— gobierna todas las ondas de probabilidad todo el tiempo, de modo que en simplicidad de formulación y economía de hipótesis es difícil de batir. La aproximación de Copenhague no es desde luego más simple. También ella invoca la ecuación de Schrödinger, pero incluye además una receta vaga y mal definida sobre cuándo debería desconectarse la ecuación de Schrödinger, y

luego una receta aún menos detallada para el proceso de colapso de onda que se entiende que toma su lugar. Que la aproximación de los muchos mundos lleve a una imagen excesivamente rica de la realidad no es para ella una mancha mayor que lo es la rica diversidad de la vida en la Tierra para la selección natural darwiniana. Mecanismos que son fundamentalmente simples pueden dar lugar a consecuencias complicadas.

Sin embargo, aunque esto establece que la navaja de Occam no es suficientemente fina como para recortar la aproximación de los muchos mundos, la abundancia de universos de la propuesta causa un problema potencial. Antes dije que, al aplicar una teoría, los físicos tienen que narrar dos tipos de historias: la historia que describe cómo el mundo evoluciona matemáticamente y la historia que vincula las matemáticas con nuestras experiencias. Pero en realidad hay una tercera historia, relacionada con estas dos, que también deben narrar los físicos. Es la historia de cómo llegamos a tener confianza en una teoría dada. En el caso de la mecánica cuántica, la tercera historia dice más o menos así: nuestra confianza en la mecánica cuántica proviene de su extraordinario éxito en explicar los datos. Si un experto cuántico utiliza la teoría para calcular que al repetir un experimento dado esperamos que un resultado ocurra, digamos, 9,62 veces más a menudo que otro, eso es lo que los experimentos ven invariablemente. A la inversa, si los resultados no hubieran estado de acuerdo con las predicciones cuánticas, los experimentadores habrían concluido que la mecánica cuántica no era correcta. En realidad, siendo científicos cuidadosos, habrían sido más cautos. Habrían considerado dudoso que la mecánica cuántica fuera correcta, pero habrían advertido que sus resultados no descartaban la teoría definitivamente. Incluso una moneda limpia arrojada mil veces puede dar series sorprendentes que desafían las probabilidades. Pero cuanto mayor es la desviación, más cabe sospechar que la moneda no es limpia; cuan-

to mayores hubieran sido las desviaciones experimentales respecto de las predichas por la mecánica cuántica, más fuerte habría sido la sospecha de los experimentadores de que la teoría estaba equivocada.

Que la confianza en la mecánica cuántica podría haber sido socavada por los datos es esencial; con cualquier teoría científica propuesta que haya sido adecuadamente desarrollada y entendida, deberíamos ser capaces de decir, al menos en principio, que si al hacer tal o cual experimento no encontramos tales o cuales resultados, nuestra confianza en la teoría debe disminuir. Y cuanto más se desvían las observaciones de las predicciones, mayor debería ser la pérdida de credibilidad.

El problema potencial con la aproximación de los muchos mundos, y la razón de que siga siendo controvertida, es que puede minar este medio para valorar la credibilidad de la mecánica cuántica. He aquí por qué. Cuando yo arrojo una moneda, sé que hay un 50 por 100 de probabilidades de que salga cara y un 50 por 100 de probabilidades de que salga cruz. Pero esa conclusión se basa en la hipótesis usual de que una moneda lanzada da un único resultado. Si una moneda lanzada sale cara en un mundo y cruz en otro, y además, si hay una copia de mí en cada mundo que es testigo del resultado, ¿qué sentido podríamos dar a las probabilidades usuales? Habrá alguien que ve lo mismo que yo, tiene mis mismos recuerdos y afirma enfáticamente que es el yo que ve cara, y otro ser, igualmente convencido de que él es yo, que ve cruz. Puesto que suceden ambos resultados —hay un Brian Greene que ve cara y un Brian Green que ve cruz—, la probabilidad familiar de haber una posibilidad igual de que Brian Green vea *o* cara *o* cruz no parece encontrarse en ninguna parte.

Lo mismo es válido para un electrón cuya onda de probabilidad se mantiene sobre Strawberry Fields y sobre la tumba de Grant, como en la Figura 8.16b. El razonamiento cuántico tra-

dicional dice que usted, el experimentador, tiene un 50 por 100 de probabilidades de encontrar el electrón en una u otra localización. Hay un usted que encontrará el electrón en Strawberry Fields y otro usted que encontrará el electrón en la tumba de Grant. Entonces, ¿cómo podemos dar sentido a las predicciones probabilistas tradicionales, que en este caso dicen que usted encontrará un resultado *o* el otro con la misma probabilidad?

La inclinación natural de muchas personas cuando se encuentran por primera vez con esta cuestión es pensar que entre los varios usted en la aproximación de los muchos mundos hay uno que de alguna manera es más real que los otros. Incluso si cada usted en cada mundo parece idéntico y tiene los mismos recuerdos, el pensamiento común es que sólo uno de estos seres es realmente usted. Y, continúa esta línea de pensamiento, es a *ese* usted, que ve uno y sólo un resultado, a quien se aplican las predicciones probabilistas. Yo aprecio esta respuesta. Hace años, cuando supe de estas ideas por primera vez, también lo pensé. Pero el razonamiento va totalmente en contra de la aproximación de los muchos mundos. Los muchos mundos practican una arquitectura minimalista. Las ondas de probabilidad simplemente evolucionan por la ecuación de Schrödinger. Así es. Imaginar que una de las copias de usted es la «real» es meter de tapadillo por la puerta de atrás algo muy parecido a Copenhague. El colapso de la onda en la aproximación de Copenhague es un medio tosco para hacer real uno y sólo uno de los resultados posibles. Si en la aproximación de los muchos mundos usted imagina que uno y sólo uno de los usted es realmente usted, está haciendo lo mismo, sólo que un poco más silenciosamente. Esa jugada borraría la razón misma para introducir el esquema de los muchos mundos. Los muchos mundos emergían del intento de Everett de abordar los fallos de Copenhague, y su estrategia consistía en no invocar nada más allá de la ecuación de Schrödinger probada en la batalla.

Es esto lo que arroja una luz incómoda sobre la aproximación de los muchos mundos. Tenemos confianza en la mecánica cuántica porque los experimentos confirman sus predicciones probabilistas. Pero en la aproximación de los muchos mundos es difícil ver cómo las probabilidades tienen siquiera un papel. Entonces, ¿cómo podemos narrar el tercer tipo de historia, la que debería proporcionar la base para nuestra confianza en el esquema de los muchos mundos? Ése es el dilema.

Si reflexionamos un poco, no es sorprendente que hayamos topado con esta pared. No hay nada fortuito en la aproximación de los muchos mundos. Las ondas simplemente evolucionan de una forma a otra de una manera descrita de manera completa y determinista por la ecuación de Schrödinger. No se arrojan dados; no se hace girar una ruleta. Por el contrario, en la aproximación de Copenhague la probabilidad entra a través del turbiamente definido colapso de onda inducido por la medida (una vez más, cuanto mayor es el valor de la onda en una localización dada, mayor es la probabilidad de que el colapso coloque a la partícula allí). Ése es el punto en la aproximación de Copenhague donde «arrojar dados» hace su aparición. Pero puesto que la aproximación de los muchos mundos renuncia al colapso, también renuncia al tradicional punto de entrada para la probabilidad.

Entonces, ¿hay un lugar para la probabilidad en la aproximación de los muchos mundos?

Probabilidad y muchos mundos

Por supuesto, Everett pensaba que lo había. El núcleo de su borrador de tesis de 1956, así como la versión recortada de

1957, estaba dedicado a explicar cómo se podía incorporar la probabilidad en la aproximación de los muchos mundos. Pero medio siglo más tarde, el debate sigue vivo. Entre los físicos y los filósofos que dedican su vida profesional a preguntarse por esto, hay un amplio abanico de opiniones sobre si, y cómo, se combinan muchos mundos y probabilidad. Algunos han argumentado que el problema es insoluble, y por ello habría que descartar la aproximación de los muchos mundos. Otros han argumentado que la probabilidad, o al menos algo disfrazado de probabilidad, puede incorporarse realmente.

La propuesta original de Everett proporciona un buen ejemplo de los puntos difíciles que surgen. En las situaciones cotidianas invocamos la probabilidad porque en general tenemos un conocimiento incompleto. Si cuando se lanza una moneda conocemos suficientes detalles (el peso y las dimensiones exactas de la moneda, cómo exactamente se lanzó y demás) seríamos capaces de predecir el resultado. Pero puesto que en general no tenemos esa información, recurrimos a las probabilidades. Un razonamiento similar es válido para el tiempo meteorológico, la lotería y cualquier otro ejemplo familiar donde la probabilidad desempeña un papel: consideramos fortuitos los resultados sólo porque nuestro conocimiento de cada situación es limitado. Everett argumentaba que las probabilidades encuentran su camino en la aproximación de los muchos mundos porque una ignorancia análoga, de un origen completamente diferente, se da necesariamente de forma imperceptible. Los habitantes de los muchos mundos sólo tienen acceso a su propio mundo único; no tienen experiencia de los otros. Everett argumentaba que con una perspectiva tan limitada llega una inyección de probabilidad.

Para hacernos una idea de cómo lo hace, dejemos por un momento la mecánica cuántica y consideremos una analogía imperfecta pero útil. Imaginemos que alienígenas del planeta

Zaxtar han conseguido construir una máquina de clonar que puede hacer copias de usted, de mí o de cualquiera. Si usted entrara en la máquina de clonar, y luego salieran dos usted, ambos estarían absolutamente convencidos de que eran el usted real, y ambos tendrían razón. Los zaxtarianos se divierten sometiendo a las formas de vida menos inteligentes a dilemas existenciales, así que vienen a la Tierra y le hacen la siguiente oferta. Esta noche, cuando usted se vaya a dormir, será cuidadosamente introducido en la máquina de clonar; cinco minutos más tarde dos usted serán extraídos de la máquina. Cuando uno de los dos usted se despierte, la vida será normal —excepto que a ese usted se le habrá garantizado cualquier cosa que desee—. Cuando el otro usted se despierte, la vida no será normal; ese usted será llevado a una cámara de tortura de vuelta en Zaxtar, para no salir nunca. Y no, a su feliz clon no se le permite desear su liberación. ¿Acepta usted la oferta?

Para la mayoría de la gente, la respuesta es no. Puesto que cada uno de los clones es realmente usted, al aceptar la oferta se le habría garantizado que habrá un usted que se despierta para vivir una vida de tormentos. Cierto es que también habrá un usted que se despierta a su vida habitual, mejorada por el poder ilimitado de un deseo arbitrario, pero el usted en Zaxtar no vivirá otra cosa que una tortura. El precio es demasiado alto.

Previendo su renuencia, los zaxtarianos suben la oferta. El mismo trato, pero ahora harán un millón y una copias de usted. Un millón de ellas se despertarán en un millón de Tierras de aspecto idéntico, con el poder de satisfacer cualquier deseo; una copia sufrirá la tortura zaxtariana. ¿Acepta usted? En este punto, usted empieza a dudar. «Vaya», piensa usted, «parece que hay muchas probabilidades de que no acabe en Zaxtar sino que me despertaré aquí en casa, y listo para satisfacer mis deseos».

Esta última intuición es especialmente relevante para la aproximación de los muchos mundos. Si las probabilidades entraron

en su pensamiento porque usted imagina que sólo uno del millón y uno de los clones es el usted «real», entonces usted no ha captado plenamente la situación. Cada copia es usted. Hay una certeza del 100 por 100 de que un usted se despierte en un futuro insoportable. Si fue esto lo que le llevó a pensar en términos de probabilidades, usted tiene que dejarlo. Sin embargo, la probabilidad puede haber entrado en su pensamiento de una manera más refinada. Imaginemos que usted aceptó la oferta zaxtariana y ahora está contemplando cómo será despertarse mañana por la mañana. Acurrucado bajo un cálido edredón, a punto de recobrar la consciencia pero con los ojos aún cerrados, usted recordará el trato zaxtariano. Al principio parecerá una pesadilla inusualmente vívida, pero cuando su corazón empiece a latir con fuerza usted reconocerá que es real —que un millón y una copias de usted están en trance de despertar, con un usted destinado para Zaxtar y los otros usted a punto de que se les conceda un poder extraordinario—. «¿Cuáles son las probabilidades», se pregunta nervioso, «de que cuando abra los ojos esté siendo enviado a Zaxtar?».

Antes de la clonación no había ninguna forma razonable de decir si era o no era probable que usted fuera encerrado en Zaxtar (es absolutamente cierto que habrá un tal usted, de modo que ¿cómo podría ser improbable?). Pero después de la clonación, la situación parece diferente. Cada clon siente como el usted real; de hecho, cada uno es el usted real. Pero cada copia es también un individuo independiente y distinto que puede indagar sobre su propio futuro. Cada una del millón y una copias puede preguntarse por la probabilidad de que vaya a Zaxtar. Y puesto que cada una sabe que sólo una del millón y una despertará a ese resultado, cada una calcula que las probabilidades de ser ese individuo infeliz son bajas. Al despertar, un millón encontrará confirmada su expectativa optimista, y sólo una no lo hará. De modo que aunque no hay nada inseguro, nada fortui-

to, nada probabilístico en el escenario zaxtariano —una vez más, no se lanzan dados ni se hacen girar ruletas—, la probabilidad parece entrar de todas formas. Lo hace a través de la ignorancia subjetiva experimentada por cada clon individual acerca de qué resultado presenciará.

Esto sugiere una aguja para inyectar probabilidades en la aproximación de los muchos mundos. Antes de que emprenda un experimento dado, usted es muy parecido a su yo preclonado. Usted contempla todos los resultados permitidos por la mecánica cuántica y sabe que hay una certeza del 100 por 100 de que una copia de usted verá cada uno de ellos. No ha aparecido nada fortuito. Entonces usted emprende el experimento. En ese momento, como sucedía con el escenario zaxtariano, se presenta una noción de probabilidad. Cada copia de usted es un ser sintiente independiente capaz de preguntarse acerca de en qué mundo llegará a habitar —es decir, la probabilidad de que cuando se revelen los resultados del experimento, vea este o ese resultado particular—. La probabilidad entra a través de la experiencia subjetiva de cada habitante.

La aproximación de Everett, que él describía como «objetivamente determinista» en la que la probabilidad «reaparece en el nivel subjetivo», resonaba con esta estrategia. Y él se sentía excitado yendo en esta dirección. Como señalaba en el borrador de 1956 de su tesis, el marco ofrecía un puente entre la posición de Einstein (que, como es sabido, creía que una teoría fundamental de la física no debería incluir la probabilidad) y la posición de Bohr (que se sentía perfectamente cómodo con una teoría fundamental que lo hiciera). Según Everett, la aproximación de los muchos mundos acomodaba ambas posiciones, y la diferencia entre ambas era simplemente una cuestión de perspectiva. La perspectiva de Einstein es la perspectiva matemática en la que la gran onda de probabilidad de todas las partículas evoluciona incesantemente por la ecuación de Schrö-

dinger, sin que el azar desempeñe el más mínimo papel.[126] Me gusta imaginar a Einstein volando sobre los muchos mundos de los muchos mundos, observando cómo la ecuación de Schrödinger dicta por completo cómo se despliega todo el panorama, y concluyendo felizmente que, incluso si la mecánica cuántica es correcta, Dios *no juega* a los dados. La perspectiva de Bohr es la de un habitante en uno de los mundos, también feliz, utilizando probabilidades para explicar, con tremenda precisión, aquellas observaciones a las que le da acceso su perspectiva limitada.

Es una versión atractiva: Einstein y Bohr poniéndose de acuerdo sobre la mecánica cuántica. Pero hay detalles molestos que durante más de medio siglo han convencido a muchos de que aún es muy pronto para firmarla. Quienes han estudiado la tesis de Everett están generalmente de acuerdo en que aunque su intento era claro —una teoría determinista que, sin embargo, aparece probabilista para sus habitantes—, no decía convincentemente cómo conseguirlo. Por ejemplo, en la línea del material cubierto en el capítulo 7, Everett trataba de determinar qué observaría un habitante «típico» de los muchos mundos en cualquier experimento dado. Pero (a diferencia de nuestro enfoque en el capítulo 7) en la aproximación de los muchos mundos los habitantes con los que tenemos que tratar son todos la misma persona; si usted es el experimentador, todos ellos son usted, y colectivamente ellos verán un abanico de resultados diferentes. Entonces, ¿quién es el «usted» típico?

Una sugerencia natural, inspirada por el escenario zaxtariano, es contar el número de ustedes que verá un resultado dado; el resultado visto por el mayor número de ustedes se calificaría entonces como típico. O, de forma más cuantitativa, definimos la probabilidad de un resultado por un valor proporcional al número de ustedes que lo ven. Con ejemplos sencillos, esto funciona: en la Figura 8.16 hay un usted que ve cada resultado,

y por ello usted cubre las apuestas al 50 por 100 de ver un resultado o el otro. Eso está bien; la predicción mecano-cuántica usual es también el 50 por 100, porque las alturas de la onda de probabilidad en las dos localizaciones son iguales.



FIGURA 8.17. La onda de probabilidad combinada para usted y su aparato de medida encuentra una onda de probabilidad que tiene múltiples picos de diferentes magnitudes.

Sin embargo, consideremos una situación más general, tal como la de la Figura 8.17, en la que las alturas de la onda de probabilidad son desiguales. Si la onda es cien veces mayor en Strawberry Fields que en la tumba de Grant, entonces la mecánica cuántica predice que es cien veces más probable que usted encuentre el electrón en Strawberry Fields. Pero en la aproximación de los muchos mundos, su medida sigue generando un usted que ve Strawberry Fields y otro usted que ve la tumba de Grant; las probabilidades basadas en el recuento del número de ustedes siguen siendo 50 por 100 —el resultado equivocado—. El origen de la discrepancia es claro. El número de ustedes que

ve un resultado u otro está determinado por el número de picos en la onda de probabilidad. Pero las probabilidades mecano-cuánticas están determinadas por alguna otra cosa —no por el número de picos, sino por sus alturas relativas—. Y son estas predicciones, las predicciones mecano-cuánticas, las que han sido convincentemente confirmadas por los experimentos.

Historia matemática

FIGURA 8.18. (a) Una ilustración esquemática de la evolución, dictada por la ecuación de Schrödinger, de la onda de probabilidad combinada para todas las partículas que le constituyen a usted y su aparato de medida, cuando usted mide la posición de

un electrón. La propia onda de probabilidad del electrón tiene picos en dos localizaciones, pero con alturas desiguales.

Everett desarrolló un argumento matemático que pretendía abordar esta discrepancia; desde entonces muchos otros lo han llevado más lejos.[127] A grandes rasgos, la idea es que al calcular las probabilidades de un resultado u otro deberíamos dar cada vez menos peso a universos cuyas alturas de onda son cada vez menores, como se representa simbólicamente en la Figura 8.18. Pero esto es desconcertante. Y controvertido. ¿Es el universo en el que usted encuentra el electrón en Strawberry Fields cien veces más genuino, o cien veces más probable, o cien veces más relevante que el universo en el que usted lo encuentra en la tumba de Grant? Ciertamente estas sugerencias crearían tensión con la creencia de que cada mundo es tan real como cada otro.

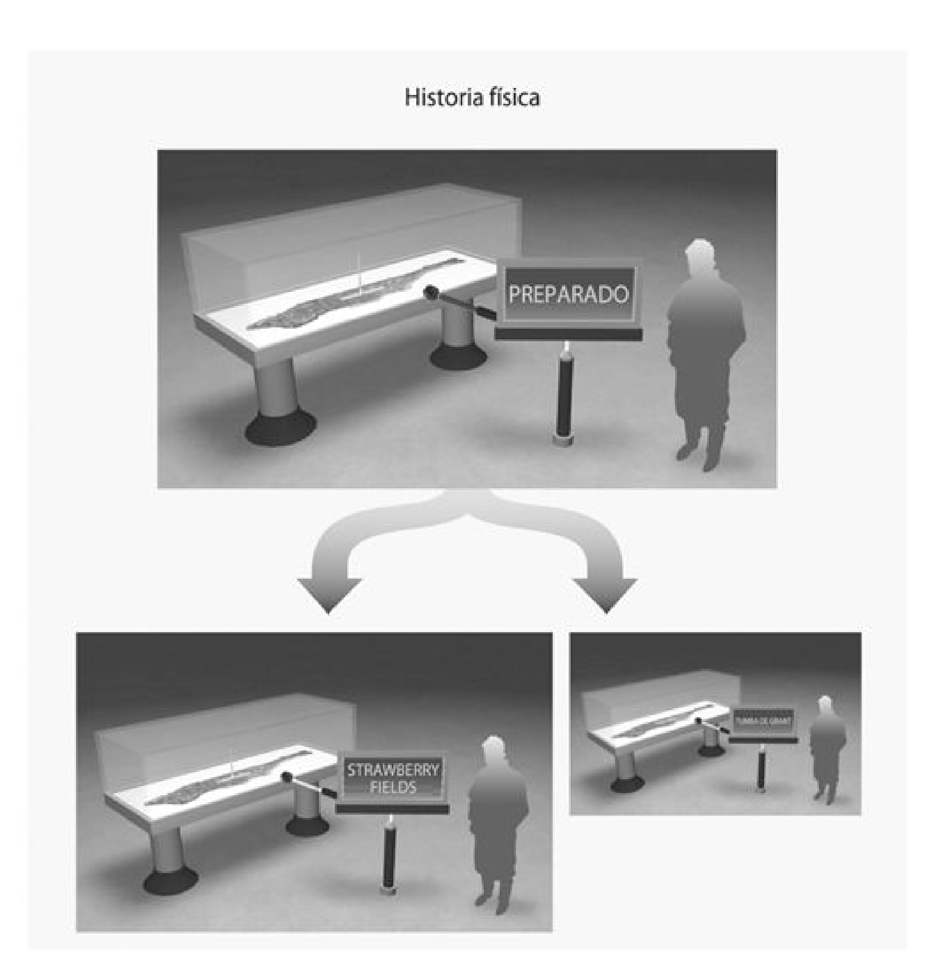


FIGURA 8.18. (b) Algunas propuestas sugieren que en la aproximación de los muchos mundos, alturas de onda desiguales implican que algunos mundos son menos genuinos, o menos relevantes, que otros. Hay controversia sobre lo que esto significa, si es que significa algo.

Después de más de cincuenta años, durante los que científicos distinguidos han revisitado, revisado y ampliado los argumentos de Everett, muchos coinciden en que el enigma persiste. Pero sigue siendo seductor imaginar que la matemáticamente simple, realmente escueta y profundamente revolucionaria aproximación de los muchos mundos da las predicciones probabilistas que forman la base de la creencia en la teoría cuánti-

ca. Esto ha sido inspiración para muchas otras ideas, más allá del razonamiento de tipo zaxtariano, para unir probabilidad y muchos mundos.[128]

Una propuesta importante procede de un destacado grupo de investigadores en Oxford, incluidos, entre otros, David Deutsch, Simon Saunders, David Wallace e Hilary Greaves. Ellos han elaborado una sofisticada línea de ataque que se centra en una cuestión aparentemente tosca. Si usted es un jugador, y cree en la aproximación de los muchos mundos, ¿cuál es la mejor estrategia para apostar en experimentos mecanocuánticos? Su respuesta, que ellos argumentan matemáticamente, es que usted debería apostar como lo haría Niels Bohr. Cuando se habla de maximizar sus ganancias, estos autores tienen en mente algo que habría provocado en Bohr un ataque de nervios —están considerando un promedio sobre los muchos habitantes del multiverso que afirman que son usted—. Pero incluso así, su conclusión es que los números que Bohr, y todos desde entonces, han estado calculando y llamando probabilidades son los mismos números que deberían guiarle para apostar. Es decir, incluso si la teoría cuántica es plenamente determinista, usted debería tratar los números *como si* fueran probabilidades.

Algunos están convencidos de que esto completa el programa de Everett. Otros no.

La falta de consenso sobre la cuestión crucial de cómo tratar la probabilidad en la aproximación de los muchos mundos no es inesperada. Los análisis son muy técnicos y además tratan un tema —la probabilidad— que es peliagudo incluso al margen de su aplicación a la teoría cuántica. Cuando usted tira un dado, todos coincidimos en que usted tiene una posibilidad entre 6 de obtener un 3, y por ello prediríamos que en el curso de, digamos, 1.200 tiradas, el número 3 saldrá unas doscientas veces. Pero puesto que es posible, y de hecho probable, que el núme-

ro 3 se desvíe de 200, ¿qué significa la predicción? Lo que queremos decir que es altamente probable que 1/6 de los resultados serán 3, pero si lo hacemos, entonces hemos definido la probabilidad de obtener un 3 invocando el concepto de probabilidad. Es un razonamiento circular. Eso sencillamente da una pequeña idea de lo conceptualmente escurridizas que son las cuestiones, más allá de su intrínseca complejidad matemática. Incluyamos en la mezcla la añadida complejidad de los muchos mundos en donde «usted» ya no se refiere a una sola persona, y no sorprende que los investigadores encuentren muchos puntos de disputa. Tengo pocas dudas de que algún día se abrirá una claridad total, pero todavía no, y quizá no durante algún tiempo.

Predicciones y comprensión

Pese a todas estas controversias, la mecánica cuántica sigue siendo la teoría más exitosa en la historia de las ideas. La razón, como hemos visto, es que para el tipo de experimentos que podemos hacer en el laboratorio, y para muchas de las observaciones que podemos hacer de procesos astrofísicos, tenemos un «algoritmo cuántico» que genera predicciones verificables. Utilizamos la ecuación de Schrödinger para calcular la evolución de las ondas de probabilidad relevantes y utilizamos los resultados —las diversas alturas de onda— para predecir la probabilidad de encontrar un resultado u otro. En lo que concierne a las predicciones, por qué funcionan estos algoritmos —si la onda colapsa en la medida, si todas las posibilidades se realizan en sus propios universos, si opera algún otro proceso— es secundario.

Algunos físicos aducen que incluso calificar la cuestión de secundaria es concederle un estatus mayor del que merece. En su opinión, la física sólo trata de hacer predicciones, y mientras las diferentes aproximaciones no afecten a dichas predicciones, ¿por qué deberíamos preocuparnos de cuál es finalmente correcta? Yo ofrezco tres ideas.

Primera: más allá de hacer predicciones, las teorías físicas deben ser matemáticamente coherentes. La aproximación de Copenhague es un esfuerzo valiente, pero no satisface este canon: en el momento crítico de observación, se retira en un silencio matemático. Ésa es una laguna sustancial. La aproximación de los muchos mundos intenta llenarla.[129]

Segunda: en algunas situaciones, las predicciones de la aproximación de los muchos mundos *diferirían* de las de la aproximación de Copenhague. En Copenhague, los procesos de colapso modificarían la Figura 8.16a para dar un solo pico. De modo que si usted hiciera interferir las dos ondas mostradas en la figura —que representan situaciones macroscópicamente distintas— y generara un patrón similar al de la Figura 8.2c, ello establecería que el colapso de onda postulado por Copenhague no sucedió. Debido a la decoherencia, como se discutió antes, hacer esto es una tarea extraordinariamente formidable, pero, al menos en teoría, las aproximaciones de Copenhague y de los muchos mundos darían predicciones diferentes.[130] Es una cuestión de principios importante. Las aproximaciones de Copenhague y de los muchos mundos suelen ser mencionadas como diferentes «interpretaciones» de la mecánica cuántica. Éste es un abuso de lenguaje. Si dos aproximaciones pueden dar predicciones diferentes, no se las puede calificar de meras interpretaciones. Bueno, puede hacerse; y la gente lo hace. Pero la terminología no es apropiada.

Tercera: la física no trata solamente de hacer predicciones. Si un día encontráramos una caja negra que predice siempre y

exactamente el resultado de nuestros experimentos de física de partículas y nuestras observaciones astronómicas, la existencia de la caja no pondría punto final a la indagación en estos campos. Hay una diferencia entre hacer predicciones y comprenderlas. La belleza de la física, su razón de ser, es que ofrece ideas acerca de por qué las cosas en el universo se comportan como lo hacen. La capacidad de predecir el comportamiento es una gran parte del poder de la física, pero el corazón de la física se perdería si no nos diera una profunda comprensión de la realidad oculta que subyace tras lo que observamos. Y si la aproximación de los muchos mundos fuera correcta, ¡qué realidad tan espectacular habría revelado nuestro indudable compromiso por entender las predicciones!

No espero ver en lo que me queda de vida un consenso teórico o experimental sobre qué versión de la realidad —un único universo, un multiverso, alguna otra cosa completamente diferente— encarna la mecánica cuántica. Pero tengo pocas dudas de que generaciones futuras considerarán retrospectivamente que nuestro trabajo en los siglos XX y XXI ha sentado generosamente la base para cualquiera que sea la imagen que finalmente emerja.

9

Agujeros negros y hologramas

El multiverso holográfico

Platón comparaba nuestra visión del mundo con la de un ancestro que observa sombras que se mueven en la pared de una oscura caverna. Imaginaba que nuestras percepciones no son más que un débil indicio de una realidad mucho más rica que palpita más allá de nuestro alcance. Dos milenios más tarde, parece que la caverna de Platón puede ser más que una metáfora. O dándole la vuelta a su sugerencia, quizá la realidad —no su mera sombra— tenga lugar en una lejana superficie frontera, mientras que todo de lo que somos testigos en las tres dimensiones espaciales comunes es una proyección de lo que se desarrolla muy lejos. Es decir, la realidad puede ser parecida a un holograma. O, realmente, una película holográfica.

Presumiblemente, el más extraño candidato a mundo paralelo, el *principio holográfico*, concibe que todo lo que experimentamos puede describirse de forma completa y equivalente como las idas y venidas que ocurren en un lugar geométrico fino y remoto. Dice que si pudiéramos entender las leyes que gobiernan la física en esa superficie lejana, y la forma en que los fenómenos allí se ligan con la experiencia aquí, captaríamos todo lo que hay que conocer sobre la realidad. Una versión del mundo de sombras de Platón —un compendio paralelo pero nada familiar de fenómenos cotidianos— *sería* realidad.

El viaje a esta posibilidad peculiar combina desarrollos profundos y arcanos: ideas de la relatividad general, de la investiga-

ción en agujeros negros, de la termodinámica, de la mecánica cuántica y, más recientemente, de la teoría de cuerdas. El hilo que une estas áreas diversas es la naturaleza de la información en un universo cuántico.

Información

Además de olfato para encontrar y tutorizar a los más dotados científicos jóvenes del mundo (además de Hugh Everett, fueron estudiantes suyos Richard Feynman, Kip Thorne y, como pronto veremos, Jacob Bekenstein), John Wheeler tenía una extraordinaria habilidad para identificar cuestiones cuya exploración podía cambiar nuestro paradigma fundamental del funcionamiento de la naturaleza. Durante un almuerzo que tuvimos en Princeton en 1998 le pregunté cuál pensaba él que sería el tema dominante en la física en las décadas venideras. Como ya había hecho varias veces ese día, bajó la cabeza, como si su cuerpo envejecido se hubiera cansado de soportar un intelecto tan masivo. Pero ahora la longitud de su silencio me hizo preguntarme, por poco tiempo, si no quería responder o si, quizá, había olvidado la pregunta. Luego levantó la cabeza lentamente y dijo una sola palabra: «Información».

No me sorprendió. Durante algún tiempo, Wheeler había estado defendiendo una visión de la ley física muy diferente de la que un físico en ciernes aprende en el currículo académico estándar. Tradicionalmente, la física se centra en cosas —planetas, rocas, átomos, partículas, campos— e investiga las fuerzas que afectan a sus comportamientos y gobiernan sus interacciones. Wheeler estaba sugiriendo que las *cosas* —materia y radiación— deberían verse como secundarias, como portadoras de

una entidad más abstracta y fundamental: la información. No es que Wheeler estuviera afirmando que materia y radiación sean de algún modo ilusorias; más bien, lo que él afirmaba es que deberían verse como las manifestaciones materiales de algo más básico. Creía que la información —dónde está una partícula, si está girando en un sentido u otro, si su carga es positiva o negativa, y todo eso— forma un núcleo irreducible en el corazón de la realidad. Que tal información esté materializada en partículas reales, que ocupan posiciones reales, que tienen espines y cargas definidos, es algo parecido a los planos de un arquitecto realizados en un rascacielos. La información fundamental está en los planos. El rascacielos no es sino una realización física de la información contenida en el diseño del arquitecto.

Desde esta perspectiva, el universo puede considerarse como un procesador de información. Toma información de cómo son las cosas ahora y produce información que describe cómo serán las cosas en el siguiente ahora, y en el ahora después de ése. Nuestros sentidos se hacen conscientes de tal procesamiento detectando cómo cambia el entorno físico con el tiempo. Pero el propio entorno físico es emergente; surge del ingrediente fundamental, la información, y evoluciona de acuerdo con las reglas fundamentales, las leyes de la física.

Yo no sé si esta posición basada en teoría de la información alcanzará la preponderancia en la física que Wheeler imaginaba. Pero recientemente, impulsado básicamente por la obra de físicos como Gerard't Hooft y Leonard Susskind, se ha producido un cambio importante en el pensamiento como resultado de cuestiones enigmáticas concernientes a la información en un contexto particularmente exótico: los agujeros negros.

Menos de un año después de la publicación de la relatividad general, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild encontró la primera solución exacta de las ecuaciones de Einstein, un resultado que determinaba la forma del espacio y el tiempo en la vecindad de un objeto masivo esférico tal como una estrella o un planeta. Curiosamente, Schwarzschild no sólo había encontrado su solución mientras calculaba trayectorias de proyectiles de artillería en el frente ruso durante la primera guerra mundial, sino que también había ganado al maestro en su propio juego: hasta entonces, Einstein sólo había encontrado soluciones aproximadas a las ecuaciones de la relatividad general. Impresionado, Einstein hizo público el logro de Schwarzschild, presentando el trabajo a la Academia Prusiana, pero incluso así no llegó a apreciar un punto que se convertiría en el legado más tentador de Schwarzschild.

La solución de Schwarzschild muestra que cuerpos familiares como el Sol y la Tierra producen una curvatura modesta, una suave depresión en la cama elástica, de otro modo plana, del espacio-tiempo. Esto encajaba bien con los resultados aproximados que Einstein había conseguido elaborar antes, pero, al prescindir de aproximaciones, Schwarzschild podía ir más lejos. Su solución exacta revelaba algo sorprendente: si se acumulara masa suficiente en una bola suficientemente pequeña, se formaría un abismo gravitatorio. La curvatura espacio-temporal se haría tan extrema que cualquier cosa que se acercase demasiado quedaría atrapada. Y puesto que «cualquier cosa» incluye la luz, tales regiones se fundirían en negro, una característica que inspiró el primitivo término «estrellas oscuras». La extrema distorsión también haría que el tiempo se parara en el borde de la estrella; de ahí otra primitiva etiqueta, «estrellas congeladas». Medio siglo más tarde, Wheeler, que era casi tan adepto al *marke-*

ting como a la física, popularizó estas estrellas tanto dentro como fuera de la comunidad científica dándoles un nombre nuevo y más memorable: agujeros negros. Cuajó.

Cuando Einstein leyó el artículo de Schwarzschild estuvo de acuerdo con las matemáticas tal como se aplicaban a estrellas o planetas ordinarios. Pero ¿cuál fue su actitud con respecto a lo que ahora llamamos agujeros negros? Einstein se burlaba de ellos. En aquellos primeros días era un desafío, incluso para Einstein, entender plenamente las intrincadas matemáticas de la relatividad general. Aunque todavía habrían de pasar décadas antes de llegar a la moderna comprensión de los agujeros negros, el intenso pliegue del espacio y el tiempo ya evidente en las ecuaciones era, en la visión de Einstein, demasiado radical para ser real. Igual que pocos años más tarde iba a resistirse a la expansión cósmica, Einstein se negaba a creer que tales configuraciones extremas de materia fueran algo más que manipulaciones matemáticas, basadas en sus propias ecuaciones, que causaban estragos.[131]

Cuando uno ve los números implicados, es fácil llegar a una conclusión similar. Para que una estrella tan masiva como el Sol sea un agujero negro, tendría que estar comprimida en una bola de unos tres kilómetros de diámetro; un cuerpo tan masivo como la Tierra se convertiría en un agujero negro sólo si se comprimiera hasta tener un centímetro de diámetro. La idea de que pudiera haber configuraciones tan extremas de materia parece casi ridícula. Pero en las décadas transcurridas desde entonces, los astrónomos han reunido aplastantes pruebas observacionales de que los agujeros negros son reales y abundantes. Hay amplio acuerdo en que muchas galaxias están alimentadas por un enorme agujero negro en su centro; se cree que nuestra propia Vía Láctea gira alrededor de un agujero negro cuya masa es unos tres millones de veces la masa del Sol. Hay incluso una posibilidad, como se discutió en el capítulo 4, de que el Gran

Colisionador de Hadrones pueda producir minúsculos agujeros negros en el laboratorio concentrando la masa (y la energía) de protones que colisionan violentamente en un volumen tan minúsculo que el resultado de Schwarzschild se aplica de nuevo, aunque en escalas microscópicas. Símbolos extraordinarios de la capacidad de las matemáticas para iluminar los rincones oscuros del cosmos, los agujeros negros se han convertido en protagonistas de la física moderna.

Además de servir como impulso para la astronomía observacional, los agujeros negros también han sido una fértil fuente de inspiración para la investigación teórica al proporcionar un terreno de juego en donde los físicos pueden llevar las ideas a su límite, realizando exploraciones con lápiz y papel de uno de los ambientes más extremos de la naturaleza. Por ejemplo, durante más de un siglo la segunda ley de la termodinámica había sido un faro en la comprensión del intercambio entre energía, trabajo y calor. Pero en los primeros años setenta del siglo XX, Wheeler se dio cuenta de que cuando se consideraba en la vecindad de un agujero negro, la venerable segunda ley parecía hacer agua. El pensamiento fresco de Jacob Bekenstein, un joven estudiante graduado de Wheeler, llegó al rescate, y al hacerlo plantó las semillas de la propuesta holográfica.

La segunda ley

El aforismo «menos es más» toma muchas formas. «Lo bueno, si breve, dos veces bueno». «Vayamos al grano». «Claro, correcto y conciso». Si estas frases son tan habituales es porque continuamente estamos bombardeados con información. Por fortuna, en la mayoría de los casos nuestros sentidos reducen

los detalles a los que realmente importan. Si yo estoy en la sabana y me encuentro con un león, no me preocupo del movimiento de cada fotón que se refleja en su cuerpo. Ésa es demasiada información. Sólo busco las características generales de dichos fotones, aquellas para cuya detección y rápida decodificación han evolucionado nuestros ojos y nuestros cerebros. ¿Viene el león hacia mí? ¿Está agazapado y acercándose? Proporcióneme un catálogo instante a instante de cada fotón reflejado y, por supuesto, estaré en posesión de todos los detalles. Pero, con todo, apenas tendré conocimiento. Menos sería realmente mucho más.

Consideraciones similares desempeñan un papel central en física teórica. A veces queremos saber cada detalle microscópico de un sistema que estamos estudiando. En ciertos lugares a lo largo de los 27 kilómetros del túnel en el que las partículas son aceleradas para someterlas a colisiones frontales, los físicos han colocado gigantescos detectores capaces de rastrear, con enorme precisión, el movimiento de los fragmentos de partículas producidos. Esenciales para sacar ideas sobre las leyes fundamentales de la física de partículas, los datos son tan detallados que en un año llenarían una pila de DVD cincuenta veces más alta que el Empire State Building. Pero, como sucede en ese imprevisto encuentro con un león, hay otras situaciones en física en donde ese nivel de detalle oscurecería en lugar de clarificar. Una rama de la física del siglo XIX llamada *termodinámica* o, en su más moderna encarnación, *mecánica estadística*, se centra en tales sistemas. La máquina de vapor, la innovación tecnológica que inicialmente impulsó la termodinámica —además de la revolución industrial— proporciona una buena ilustración.

El corazón de una máquina de vapor es un tanque con vapor de agua que se expande cuando se calienta, lo que empuja al pistón de la máquina, y se contrae cuando se enfría, lo que devuelve el pistón a su posición inicial, listo para ser empujado de

nuevo. A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los físicos estudiaron los soportes moleculares de la materia, que entre otras cosas proporcionaban una imagen microscópica de la acción del vapor. Cuando el vapor se calienta, sus moléculas de H_2O adquieren una velocidad creciente y chocan con la parte interna del pistón. Cuanto más calientes están, más rápidas van y mayor es el empuje. Una idea simple, pero una idea esencial en termodinámica, es que para entender la fuerza del vapor no necesitamos conocer en detalle qué moléculas concretas llevan esta o esa velocidad, o cuáles inciden en el pistón exactamente aquí o allí. Proporcióneme una lista de billones y billones de trayectorias moleculares, y yo le miraré tan perplejo como lo haría si usted listara los fotones que rebotan en el león. Para descubrir el empuje sobre el pistón sólo necesito el número medio de moléculas que incidirán sobre el mismo en un intervalo de tiempo dado, y la velocidad media que tendrán cuando lo hagan. Éstos son datos mucho más groseros, pero es precisamente esa información filtrada la que es útil.

En la elaboración de métodos matemáticos que sacrifican sistemáticamente el detalle a cambio de esta comprensión de nivel superior, los físicos utilizaron un amplio abanico de técnicas y desarrollaron varios conceptos poderosos. Uno de éstos, que ya ha aparecido brevemente en capítulos anteriores, es la *entropía*. Inicialmente introducida a mediados del siglo XIX para cuantificar la disipación de energía en motores de combustión, la visión moderna, que surge del trabajo de Ludwig Boltzmann en los años ochenta del siglo XIX, dice que la entropía proporciona una caracterización de cuán ordenados —o no— tienen que estar los componentes de un sistema dado para que éste tenga la apariencia general que posee.

Para hacerse una idea, imagine que Félix está frenético porque cree que el apartamento que comparte con Óscar ha sido allanado. «¡Nos lo han dejado manga por hombro!», le dice a

Óscar. Éste le quita importancia —seguramente Félix está teniendo uno de sus momentos—. Para ello, Óscar abre la puerta de su dormitorio, que muestra ropas, cajas de *pizza* vacías y latas de cerveza aplastadas tiradas por todas partes. «Está igual que siempre», grita Óscar. Félix no se calma. «Claro que parece igual: revuelve una pocilga y tienes una pocilga. Pero mira mi habitación». Y abre su puerta. «¡Así que destrozada!», se burla Óscar; «está más pulcra que un *whisky* seco». «Pulcra, sí. Pero los intrusos han dejado su huella. ¿Mis frascos de vitaminas? No están ordenados por tamaños. ¿Mis obras completas de Shakespeare? No guardan el orden alfabético. ¿Y mi cajón de los calcetines? Mira esto: ¡algunos pares negros están en el estante azul! Manga por hombro, te digo. Obviamente manga por hombro».

Dejando aparte la histeria de Félix, la situación aclara un punto simple pero esencial. Cuando algo está muy desordenado, como la habitación de Óscar, muchos cambios posibles de sus constituyentes dejan intacta su apariencia general. Tome las veintiséis camisetas arrugadas que estaban desperdigadas por la cama, el suelo y la estantería, tírelas por aquí y por allá, y la habitación parecerá igual. Pero cuando algo está muy ordenado, como la habitación de Félix, incluso pequeños cambios pueden ser fácilmente detectados.

Esta distinción subyace en la definición matemática de entropía. Tome cualquier sistema y vea de cuántas maneras pueden reordenarse sus constituyentes sin afectar a su apariencia macroscópica general. Ese número es la entropía del sistema.[132] Si hay un gran número de estos reordenamientos, entonces la entropía es alta: el sistema es altamente desordenado.

Como ejemplos más convencionales, consideremos un tanque de vapor y un cubo de hielo. Centrémonos solamente en sus propiedades macroscópicas generales, las que se pueden medir y observar sin acceder al estado detallado de los constitu-

yentes moleculares de uno u otro. Cuando usted agita el vapor con la mano, reordena las posiciones de millones de millones de millones de moléculas de H_2O, y pese a todo la niebla uniforme del tanque no parece perturbada. Pero cambie aleatoriamente las posiciones y las velocidades de un número similar de moléculas en un bloque de hielo, e inmediatamente verá el impacto: la estructura cristalina del hielo se romperá. Aparecerán fisuras y fracturas. El vapor, con moléculas de H_2O que se mueven aleatoriamente en el recipiente, es altamente desordenado; el hielo, con moléculas de H_2O dispuestas en una red cristalina, es altamente ordenado. La entropía del vapor es alta (hay muchos reordenamientos que lo dejarán con la misma apariencia); la entropía del hielo es baja (pocos reordenamientos lo dejarán con la misma apariencia).

Al evaluar la susceptibilidad de la apariencia macroscópica de un sistema frente a sus detalles microscópicos, la entropía es un concepto natural en un formalismo matemático que se centra en propiedades físicas agregadas. La segunda ley de la termodinámica desarrollaba está línea de pensamiento de forma cuantitativa. La ley afirma que, con el tiempo, la entropía total de un sistema aumentará.[133] Entender por qué requiere tan sólo un conocimiento muy elemental del azar y la estadística. Por definición, una configuración de entropía más alta puede ser realizada por muchas más disposiciones microscópicas que una configuración de entropía más baja. Cuando el sistema evoluciona, es aplastantemente probable que pase a estados de entropía más alta puesto que, dicho simplemente, hay más de éstos. Muchos más. Cuando el pan se está cociendo, usted lo huele en la casa porque las disposiciones de las moléculas que salen del pan y se dispersan, dando un olor uniforme, son billones de veces más numerosas que las disposiciones en las que las moléculas están concentradas en un rincón de la cocina. Los movimientos aleatorios de las moléculas calientes las impulsarán,

con certeza, hacia una de las numerosas disposiciones dispersadas, y no hacia una de las pocas configuraciones concentradas. Es decir, la colección de moléculas evoluciona de menor a mayor entropía, y ésa es la segunda ley en acción.

La idea es general. Un cristal que se hace añicos, una vela que arde, tinta que se derrama, perfume que impregna: éstos son procesos diferentes, pero las consideraciones son las mismas. En cada uno de ellos el orden se degrada a desorden y lo hace porque hay muchas maneras de estar desordenado. La belleza de este tipo de análisis —la idea me provocó uno de los más fuertes momentos «¡Ajá!» en mi educación en física— es que, sin perderse en los detalles microscópicos, tenemos un principio guía para explicar por qué muchos fenómenos se despliegan de la forma que lo hacen.

Nótese también que, al ser estadística, la segunda ley no dice que la entropía no pueda disminuir, sino sólo que es extremadamente improbable que lo haga. Las moléculas de la leche que usted vierte en su café podrían, como resultado de sus movimientos aleatorios, formar una figurilla flotante de Santa Claus. Pero recobre el aliento. Un Santa Claus lechoso flotante tiene muy poca entropía. Si usted revuelve algunos miles de millones de sus moléculas, advertirá el resultado: Santa perderá su cabeza o un brazo, o se dispersará en volutas blancas abstractas. En comparación, una configuración en la que las moléculas de leche están uniformemente dispersas tiene muchísima más entropía: un inmenso número de reordenamientos seguirá pareciendo café con leche normal. Entonces, con una enorme probabilidad, la leche derramada en su café negro lo convertirá en un marrón uniforme, sin ningún Santa Claus a la vista. Consideraciones similares son válidas para la inmensa mayoría de evoluciones de alta-a-baja-entropía, lo que hace que la segunda ley parezca inviolable.

Vayamos ahora al punto de Wheeler sobre los agujeros negros. Ya en los primeros años setenta del siglo pasado, Wheeler señaló que cuando los agujeros negros entran en escena la segunda ley parece puesta en compromiso. Un agujero negro cercano parece proporcionar un medio dispuesto y fiable para reducir la entropía total. Arroje cualquier sistema que usted esté estudiando —vidrio roto, velas quemadas, tinta derramada— al interior del agujero. Puesto que nada escapa de un agujero negro, parecería que el desorden del sistema ha desaparecido para siempre. Por cruda que pueda parecer la aproximación, parece fácil reducir la entropía total si usted tiene un agujero negro con el que trabajar. La segunda ley, pensaban muchos, había encontrado la horma de su zapato.

Bekenstein, el estudiante de Wheeler, no estaba convencido. Quizá, sugirió Bekenstein, la entropía no se pierde en el agujero negro, sino que simplemente se transfiere al mismo. Después de todo, nadie afirmaba que al engullir polvo y estrellas, los agujeros negros proporcionan un mecanismo para violar la primera ley de la termodinámica, la ley de conservación de la energía. En su lugar, las ecuaciones de Einstein muestran que cuando un agujero negro engulle, se hace más grande y más pesado. La energía en una región puede redistribuirse, parte cayendo en el agujero y parte quedando fuera, pero la energía total se conserva. Quizá, sugirió Bekenstein, la misma idea se aplica a la entropía. Parte de la entropía queda fuera de un agujero negro dado y parte de la entropía cae dentro, pero nada se pierde.

Esto suena razonable, pero los expertos rebatieron a Bekenstein. La solución de Schwarzschild, y muchos trabajos posteriores, parecían establecer que los agujeros negros son el ejemplo perfecto de orden. La materia y la radiación que caen

en él, por mezcladas y desordenadas que estén, son comprimidas a un tamaño infinitesimal en el centro de un agujero negro: un agujero negro es lo último en compactación de basuras. En verdad, nadie sabe qué sucede exactamente durante esta potente compresión, porque los niveles extremos de curvatura y densidad desbaratan las ecuaciones de Einstein; pero no parece que el centro de un agujero negro tenga capacidad para albergar desorden. Y fuera del centro, un agujero negro no es otra cosa que una región vacía del espacio-tiempo que se extiende hasta la frontera de no retorno —el horizonte de sucesos— como en la Figura 9.1 Sin átomos ni moléculas que vayan en una dirección u otra, y por lo tanto sin constituyentes que reordenar, un agujero negro parecería estar libre de entropía.

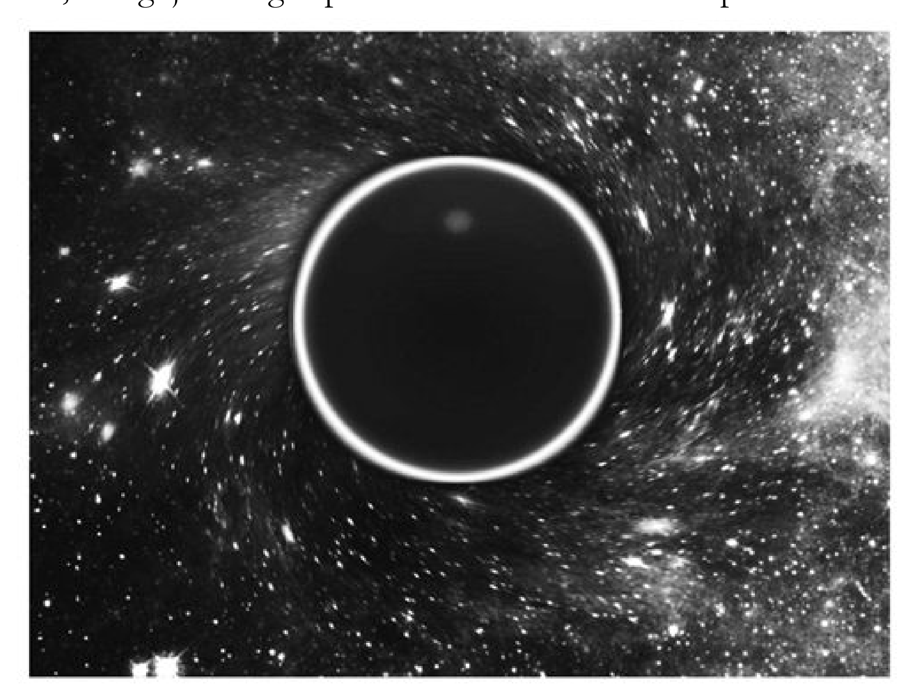


FIGURA 9.1. Un agujero negro comprende una región de espacio-tiempo rodeada por una superficie de no retorno, el horizonte de sucesos.

En los años setenta esta idea se vio reforzada por los denominados *teoremas de ausencia de pelo*, que establecían matemáticamente que los agujeros negros, igual que los rapados actores de Blue Man Group,[134] carecen de características distintivas. Según los teoremas, dos agujeros negros cualesquiera que tengan la misma masa, misma carga y mismo momento angular (velocidad de rotación) son idénticos. Careciendo de otros rasgos intrínsecos —como los Blue Man carecen de flequillos, greñas o perillas—, los agujeros negros parecían carecer de las diferencias subyacentes que albergarían entropía.

Por sí mismo, éste era un argumento bastante convincente, pero todavía había una consideración más negativa que parecía refutar definitivamente la idea de Bekenstein. De acuerdo con la termodinámica básica, hay una estrecha asociación entre entropía y temperatura. La temperatura es una medida del movimiento promedio de los constituyentes de un objeto; los objetos calientes tienen constituyentes que se mueven rápidamente, y los objetos fríos tienen constituyentes con movimiento lento. La entropía es una medida de los reordenamientos posibles de estos constituyentes que desde un punto de vista macroscópico pasarían inadvertidos. Pero entropía y temperatura dependen de las características agregadas de los constituyentes de un objeto; van de la mano. Cuando se desarrolló matemáticamente, se hizo claro que si Bekenstein tenía razón y los agujeros negros llevaban entropía, también deberían tener una temperatura.[135] *Esta* idea hizo sonar los timbres de alarma. Cualquier objeto con una temperatura no nula irradia. El carbón caliente irradia luz visible; nosotros, los seres humanos, irradiamos en el infrarrojo. Si un agujero negro tiene una temperatura no nula, las mismas leyes de la termodinámica que Bekenstein trataba de preservar afirman que también debería irradiar. Pero eso está en flagrante contradicción con el saber establecido de que nada puede escapar de la garra gravitatoria de un agujero negro. Casi

todos concluyeron que Bekenstein estaba equivocado. Los agujeros negros no tienen temperatura. Los agujeros negros no albergan entropía. Los agujeros negros son sumideros de entropía. En su presencia, la segunda ley de la termodinámica falla.

A pesar de la creciente evidencia en su contra, Bekenstein tenía un atractivo resultado a su favor. En 1971, Stephen Hawking se dio cuenta de que los agujeros negros obedecen a una curiosa ley. Si usted tiene una colección de agujeros negros de masas y tamaños variables, algunos dedicados a valses orbitales, otros atrayendo materia y radiación vecinas, y otros chocando entre sí, *el área de la superficie total de los agujeros negros aumenta con el tiempo*. Por «área de la superficie», Hawking entendía el horizonte de sucesos de cada agujero negro. Ahora bien, hay muchos resultados en física que aseguran que hay magnitudes que no cambian con el tiempo (conservación de la energía, conservación de la carga, conservación del momento y demás), pero hay muy pocos que exigen que algunas magnitudes aumenten. Era natural entonces considerar una posible relación entre el resultado de Hawking y la segunda ley. Si concebimos que de algún modo el área de la superficie de un agujero negro es una medida de la entropía que contiene, entonces el aumento en el área de la superficie total podía leerse como un aumento en la entropía total.

Era una analogía convincente, pero nadie la compró. La similitud entre el teorema del área de Hawking y la segunda ley no era, en opinión de la mayoría, más que una coincidencia. Así estaban las cosas hasta que pocos años más tarde Hawking completó uno de los cálculos más influyentes de la moderna física teórica.

Puesto que la mecánica cuántica no desempeña ningún papel en la relatividad general de Einstein, la solución de agujero negro de Schwarzschild se basa puramente en la física clásica. Pero un tratamiento adecuado de materia y radiación —de partículas como fotones, neutrinos y electrones que pueden llevar masa, energía y entropía de un lugar a otro— requiere la física cuántica. Para valorar plenamente la naturaleza de los agujeros negros y entender cómo interaccionan con la materia y la radiación, debemos actualizar el trabajo de Schwarzschild para incluir consideraciones cuánticas. Esto no es fácil. A pesar de los avances en teoría de cuerdas (así como en otras aproximaciones que no hemos discutido, tales como gravedad cuántica de lazos, twistores y teoría de topos), aún estamos en una etapa primitiva en nuestro intento de unir física cuántica y relatividad general. Volviendo a los años setenta, entonces había una base teórica aún menor para entender cómo la mecánica cuántica afectaría a la gravedad.

Incluso así, varios investigadores pioneros elaboraron una unión parcial de la mecánica cuántica y la relatividad general considerando campos cuánticos (la parte cuántica) que evolucionan en un ambiente espacio-temporal fijo pero curvo (la parte de relatividad general). Como señalé en el capítulo 4, una unión completa consideraría, cuando menos, no sólo las fluctuaciones cuánticas de los campos dentro del espacio-tiempo, sino también las fluctuaciones del propio espacio-tiempo. Para facilitar el avance, el trabajo inicial evitaba esta complicación. Hawking aceptó la unión parcial y estudió cómo se comportarían los campos cuánticos en un escenario espacio-temporal muy particular: el creado por la presencia de un agujero negro. Lo que encontró casi hizo caerse a los físicos de sus asientos.

Una característica bien conocida de los campos cuánticos en el espacio-tiempo ordinario, vacío y no curvado, es que sus fluctuaciones permiten que pares de partículas, por ejemplo un electrón y su antipartícula, el positrón, se materialicen momentáneamente a partir de la nada, tengan una existencia fugaz y luego se aniquilen mutuamente. Este proceso, la *producción de pares cuánticos*, ha sido estudiado intensamente tanto teórica como experimentalmente, y es plenamente entendido.

Una característica nueva de la producción de pares cuánticos es que mientras que un miembro del par tiene energía positiva, la ley de conservación de la energía dicta que el otro debe tener una cantidad equivalente de *energía negativa* —un concepto que no tendría sentido en un universo clásico—.[136] Pero el principio de incertidumbre ofrece una ventana de extrañeza por la que se permiten partículas de energía *negativa* mientras no se hagan demasiado manifiestas. Si una partícula existe sólo fugazmente, la incertidumbre cuántica establece que ningún experimento tendrá el tiempo adecuado, ni siquiera en principio, para determinar el signo de su energía. Ésta es la misma razón por la que el par de partículas está condenado por las leyes cuánticas a la rápida aniquilación. Así, una y otra vez, las fluctuaciones cuánticas dan como resultado pares de partículas creadas y aniquiladas, creadas y aniquiladas… a medida que la inevitable marcha de la incertidumbre cuántica se manifiesta en un espacio por lo demás vacío.

Hawking reconsideró tales fluctuaciones cuánticas ubicuas no en el escenario del espacio vacío, sino cerca del horizonte de un agujero negro. Encontró que a veces los sucesos son muy parecidos a como lo son normalmente. Se crean aleatoriamente pares de partículas; rápidamente se encuentran unas a otras; se destruyen. Pero de vez en cuando sucede algo nuevo. Si las partículas se forman suficientemente cerca del borde del agujero negro, una puede ser absorbida, mientras que la otra escapa al

espacio. En ausencia de un agujero negro esto no sucede nunca, porque si las partículas no se aniquilaran mutuamente, entonces la partícula con energía negativa sobreviviría a la niebla protectora de la incertidumbre cuántica. Hawking se dio cuenta de que la deformación radical del espacio y el tiempo del agujero negro puede hacer que partículas que tienen energía negativa para alguien que está fuera del agujero parezcan tener energía *positiva* para cualquier observador infortunado dentro del agujero. De este modo, un agujero negro proporciona a las partículas de energía negativa un refugio seguro, y con ello elimina la necesidad de un manto cuántico. Las partículas que así brotan pueden evitar la aniquilación mutua y seguir sus caminos independientes.[137]

Las partículas de energía positiva salen disparadas hacia fuera del horizonte de sucesos del agujero negro, de modo que alguien que las observara desde lejos las vería como radiación, una forma de radiación llamada desde entonces *radiación de Hawking*. Las partículas de energía negativa no se ven directamente, porque caen dentro del agujero negro, pero en cualquier caso tienen un impacto detectable. Así como la masa de un agujero negro aumenta cuando absorbe algo que lleva energía positiva, también su masa disminuye cuando absorbe algo que lleva energía negativa. En conjunto, estos dos procesos hacen que el agujero negro parezca un trozo de carbón ardiendo: el agujero negro emite un flujo saliente de radiación mientras su masa se hace cada vez menor.[138] Cuando se incluyen consideraciones cuánticas, los agujeros negros ya no son completamente negros. Éste fue el trueno que provocó Hawking.

Esto no quiere decir que su agujero negro promedio esté al rojo vivo. Cuando las partículas salen desde el inmediato exterior del agujero negro, luchan cuesta arriba para escapar del fuerte tirón gravitatorio. Al hacerlo gastan energía y, por ello, se enfrían sustancialmente. Hawking calculó que un observador

lejos del agujero negro encontraría que la temperatura para la radiación «cansada» resultante era inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Un agujero negro enorme, como el que hay en el centro de nuestra galaxia, tiene una temperatura que es menor que una billonésima de grado sobre el cero absoluto. Un agujero negro con la masa del Sol tendría una temperatura menor que una millonésima de grado, minúscula incluso comparada con la radiación cósmica de fondo de 2,7 grados que nos dejó el big bang. Para que la temperatura de un agujero negro sea suficientemente alta como para asar la comida de la familia, su masa tendría que ser de aproximadamente diez milésimas la de la Tierra, extraordinariamente pequeña para los niveles astrofísicos.

Pero la magnitud de la temperatura de un agujero negro es algo secundario. Aunque la radiación procedente de agujeros negros astrofísicos lejanos no ilumina el cielo nocturno, el hecho de que tengan temperatura, que emitan radiación, sugiere que los expertos habían rechazado demasiado rápidamente la sugerencia de Bekenstein de que los agujeros negros tienen entropía. Entonces Hawking puso el último clavo. Sus cálculos teóricos, que determinan una temperatura de agujero negro y la radiación que emite, le dieron todos los datos que necesitaba para determinar la cantidad de entropía que el agujero negro debería contener, de acuerdo con las leyes estándar de la termodinámica. Y la respuesta que encontró es proporcional al área de la superficie del agujero negro, precisamente lo que Bekenstein había propuesto.

Así que, a finales de 1974, la segunda ley era ley otra vez. Las intuiciones de Bekenstein y Hawking establecían que en cualquier situación la entropía total aumenta, siempre que se tenga en cuenta no sólo la entropía de la materia y la radiación ordinarias, sino también la contenida dentro de los agujeros negros, medida por el área total de su superficie. Más que ser sumide-

ros de entropía que violan la segunda ley, los agujeros negros desempeñan una parte activa en mantener el pronunciamiento de la ley de un universo con un desorden cada vez mayor.

La conclusión proporcionó un alivio bien recibido. Para muchos físicos, la segunda ley, que emerge de consideraciones estadísticas aparentemente incuestionables, era de lo más sagrado en ciencia. Su restauración significaba que, de nuevo, todo estaba bien en el mundo. Pero, con el tiempo, un pequeño detalle vital en el recuento de la entropía dejó claro que la hoja de balance de la segunda ley no era la cuestión más profunda que había en juego. Ese honor quedaba para la identificación de dónde se almacena la entropía, una cuestión cuya importancia se hace evidente cuando reconocemos el vínculo profundo entre la entropía y el tema central de este capítulo: la información.

Entropía e información oculta

Hasta aquí, he descrito la entropía, vagamente, como una medida del desorden y, de forma más cuantitativa, como el número de reordenamientos de los constituyentes de un sistema microscópico que dejan invariables sus características macroscópicas generales. He dejado implícito, pero ahora haré explícito, que se puede considerar que la entropía mide la *diferencia en información* entre los datos que se tienen (aquellas características macroscópicas generales) y los datos que no se tienen (la disposición microscópica particular del sistema). La entropía mide la información adicional oculta dentro de los detalles microscópicos del sistema que, si usted tuviera acceso a ellos, distinguirían la configuración en un micronivel dentro de todos los macroniveles de apariencia similar.

Para ilustrarlo, imaginemos que Óscar ha ordenado su habitación, salvo que los mil dólares de plata que ganó al póquer la semana pasada siguen desperdigados por el suelo. Incluso después de reunirlos en un montón, Óscar sólo ve una colección aleatoria de monedas de dólar, unas que muestran cara y otras que muestran cruz. Si usted cambiara al azar algunas caras por cruces y otras cruces por caras, él nunca lo advertiría —prueba de que el sistema de los mil dólares de plata arrojados al suelo tiene alta entropía—. De hecho, este ejemplo es tan explícito que podemos hacer el recuento de entropía. Si hubiera sólo dos monedas, habría cuatro configuraciones posibles: cara-cara, cara-cruz, cruz-cara, y cruz-cruz —dos posibilidades para el primer dólar multiplicadas por dos para el segundo. Con tres monedas habría ocho disposiciones posibles: cara-cara-cara, cara-cara-cruz, cara-cruz-cara, cara-cruz-cruz, cruz-cara-cara, cruz-cara-cruz, cruz-cruz-cara, cruz-cruz-cruz, que proceden de dos posibilidades para la primera multiplicado por dos para la segunda multiplicado por dos para la tercera. Con mil monedas, el número de probabilidades sigue exactamente la misma pauta: un factor de dos por cada moneda, lo que da un total de $2^{1.000}$, que es 10715086071862673209 48425049060001810561 40481170553360744375 03883703510511249361 22493198378815695858 12759467291755314682 51871452856923140435 98457757469857480393 45677748242309854210 7460506237114187795 41821530464749835819 41267398767559165543 94607706291457119647 76865421676604298316 52624386837205668069 376. La inmensa mayoría de estas disposiciones caras-cruces no tendría características distinguibles, de modo que no sobresaldría en ningún caso. Algunas *lo harían*; por ejemplo, si las mil monedas fueran caras o todas fueran cruces, o si 999 fueran caras, o 999 fueran cruces. Pero el número de tales configuraciones inusuales es tan extraordinaria-

mente pequeño, comparado con el número de posibilidades totales, que eliminarlas del recuento apenas supondría una diferencia.[139]

De nuestra anterior discusión usted deduciría que el número $2^{1.000}$ es la entropía de las monedas. Y para algunos fines, esa conclusión sería buena. Pero para establecer el vínculo más fuerte entre entropía e información, tengo que afinar la descripción que di antes. La entropía de un sistema está relacionada con el número de reordenamientos indistinguibles de sus constituyentes, pero estrictamente hablando no es igual al propio número. La relación se expresa mediante una operación matemática llamada un *logaritmo*; no se asuste si esto le trae malos recuerdos de las matemáticas del instituto. En nuestro ejemplo de las monedas, significa simplemente que usted toma el exponente en el número de reordenamientos; es decir, la entropía se define como 1.000, y no como $2^{1.000}$.

Utilizar logaritmos tiene la ventaja de que nos permite trabajar con números más manejables, pero hay una motivación más importante. Imaginemos que yo le pregunto cuánta información tiene usted que suministrar para describir una disposición particular caras-cruces de las mil monedas. La respuesta más simple es que usted tendría que dar la lista —cara, cara, cruz, cara, cruz, cruz…— que especifica la disposición de cada una de las mil monedas. Por supuesto, respondo yo, eso me diría los detalles de la configuración, pero no era ésa mi pregunta. Yo le pregunté *cuánta información* hay contenida en esa lista.

Así que usted empieza a preguntarse. ¿Qué *es* realmente la información, y qué la hace? Su respuesta es simple y directa. La información responde a preguntas. Años de investigación por parte de matemáticos, físicos y científicos de la computación han precisado esto. Sus investigaciones han establecido que la medida más útil de contenido de información es el *número de preguntas sí-no distintas a las que la información puede dar respuesta*. La

información de las monedas da respuesta a mil de tales preguntas. ¿Es cara el primer dólar? Sí. ¿Es cara el segundo dólar? Sí. ¿Es cara el tercer dólar? No. ¿Es cara el cuarto dólar? Sí. Y así sucesivamente. Un dato que puede responder a una única pregunta sí-no se denomina un *bit* —un término familiar en la era de los computadores que es una abreviatura de *binary digit*, lo que significa un 0 o un 1, que usted puede considerar como una representación numérica de sí o no—. La disposición caras-cruces de las mil monedas contiene así el equivalente a mil bits de información. O de forma equivalente, si usted adopta la perspectiva macroscópica de Óscar y se centra sólo en la apariencia aleatoria global de las monedas mientras pasa por alto los detalles «microscópicos» de la disposición caras-cruces, la información «oculta» en las monedas contiene mil bits.

Note que el valor de la entropía y la cantidad de información oculta son iguales. Eso no es casual. El número de posibles reordenamientos caras-cruces es el número de respuestas posibles a las mil preguntas —sí, sí, no, no, sí… o sí, no, sí, sí, no… o no, sí, no, no, no…, y así sucesivamente—; a saber, $2^{1.000}$. Con la entropía definida como el logaritmo del número de tales reordenamientos —mil en este caso—, la entropía es el número de preguntas sí-no a la que responde cualquiera de tales secuencias.

Me he centrado en las mil monedas para dar un ejemplo concreto, pero el vínculo entre entropía e información es general. Los detalles microscópicos de cualquier sistema contienen información que está oculta cuando sólo tenemos en cuenta las características macroscópicas. Por ejemplo, usted conoce la temperatura, la presión y el volumen de un tanque de vapor, pero ¿incidió una molécula de H_2O exactamente en la esquina superior derecha de la caja? ¿Incidió otra exactamente en el punto medio del borde inferior izquierdo? Como en el caso de los dólares desperdigados, la entropía de un sistema es el nú-

mero de preguntas sí-no que sus detalles microscópicos tienen capacidad de responder, y por eso la entropía es una medida del contenido de información oculta del sistema.[140]

Entropía, información oculta y agujeros negros

¿Cómo se aplica esta noción de entropía, y su relación con la información oculta, a los agujeros negros? Cuando Hawking desarrolló el argumento mecano-cuántico detallado que vincula la entropía de un agujero negro con el área de su superficie, no sólo dio precisión cuantitativa a la sugerencia original de Bekenstein, sino que también ofreció un algoritmo para calcularla. Tomemos el horizonte de sucesos de un agujero negro, recetó Hawking, y dividámoslo en una malla con celdas de una longitud de Planck (10^{-33} cm) de lado. Hawking demostró matemáticamente que la entropía del agujero negro es el número de tales celdas necesario para cubrir su horizonte de sucesos —es decir, el área de la superficie del agujero negro medida en unidades del Planck al cuadrado (10^{-66} centímetros cuadrados por celda) —. En el lenguaje de la información oculta, es como si cada una de estas celdas llevara secretamente un único bit, un 0 o un 1, que proporciona la respuesta a una única pregunta sí-no que especifica algún aspecto de la constitución microscópica del agujero negro.[141] Esto se ilustra esquemáticamente en la Figura 9.2.

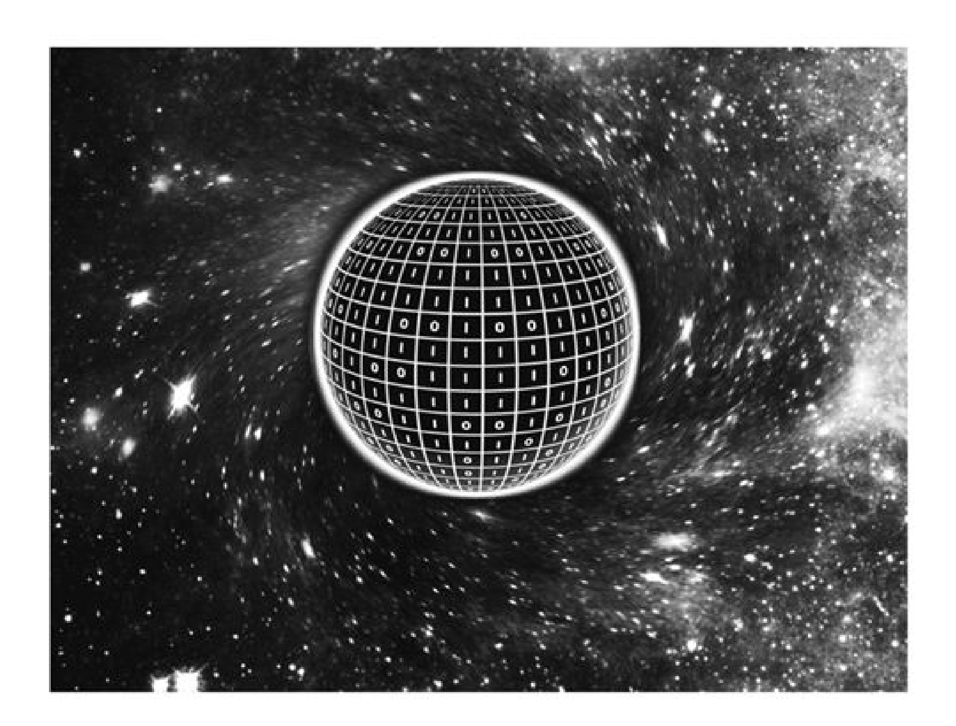


FIGURA 9.2. Stephen Hawking demostró matemáticamente que la entropía de un agujero negro es igual al número de celdas de tamaño de Planck que se necesitan para cubrir su horizonte de sucesos. Es como si cada una de las celdas llevara un bit, una unidad básica de información.

La relatividad general de Einstein, así como los teoremas de ausencia de pelo del agujero negro, ignoran la mecánica cuántica, y por eso pierden completamente esta información. Escojamos valores para su masa, su carga y su momento angular, y hemos especificado unívocamente un agujero negro, dice la relatividad general. Pero la lectura más directa de Bekenstein y Hawking nos dice que no lo hemos hecho. Su trabajo establecía que debe de haber muchos agujeros negros diferentes con las mismas características macroscópicas y que, sin embargo, difieren microscópicamente. E igual que en el caso de escenarios más típicos —monedas en el suelo, vapor en un tanque—, la

entropía del agujero negro refleja la información oculta dentro de los detalles más finos.

Por exóticos que puedan ser los agujeros negros, estos desarrollos sugerían que, en lo que respecta a la entropía, los agujeros negros se comportan como todo lo demás. Pero los resultados también planteaban enigmas. Aunque Bekenstein y Hawking nos dicen cuánta información está oculta dentro de un agujero negro, no nos dicen qué es esta información. No nos dicen las preguntas concretas sí-no a las que responde la información, ni siquiera especifican los constituyentes microscópicos que se pretende describir con la información. Los análisis matemáticos dan la *cantidad* de información que contiene un agujero negro, sin proporcionar ideas sobre la propia información.[142]

Éstas eran —y siguen siendo— cuestiones desconcertantes. Pero hay otro enigma que parece aún más básico. ¿Por qué la cantidad de información estaría dictada por el área de la superficie del agujero negro? Lo que quiero decir es que si usted me preguntara cuánta información había almacenada en la Librería del Congreso, me gustaría saber cuánto espacio disponible hay *dentro* de la Biblioteca del Congreso. Me gustaría saber la capacidad disponible, dentro de la caverna interior de la biblioteca, para colocar libros, archivar microfichas y apilar mapas, fotografías y documentos. Lo mismo vale para la información que hay en mi cabeza, que parece estar relacionada con el volumen de mi cerebro, el espacio disponible para interconexiones neuronales. Y vale también para la información en un tanque de vapor, que está almacenada en las propiedades de las partículas que llenan el recipiente. Pero, sorprendentemente, Bekenstein y Hawking establecieron que en el caso de un agujero negro la capacidad de almacenamiento de información está determinada no por el volumen de su interior, sino por el área de su superficie.

Antes de estos resultados, los físicos habían argumentado que puesto que la longitud de Planck (10^{-33}cm) era aparentemente la longitud más corta para la que sigue teniendo sentido la noción de «distancia», el volumen significativo más pequeño sería un cubo minúsculo en que cada uno de sus lados tuviera una longitud de Planck (un volumen de 10^{-99} centímetros cúbicos). Una conjetura razonable, ampliamente aceptada, era que, independientemente de los futuros avances tecnológicos, el volumen más pequeño posible no podría almacenar más que la más pequeña unidad de información: un bit. Y por eso se esperaba que una región del espacio maximizaría su capacidad de almacenamiento de información cuando el número de bits que contuviera fuera igual al número de cubos de Planck que podría encajar en su interior. Que el resultado de Hawking incluyera la longitud de Planck no era por lo tanto sorprendente. La sorpresa era que el almacenamiento de información oculta del agujero negro estaba determinado por el número de cuadrados del tamaño de Planck que cubren su superficie, y no por el número de cubos de tamaño de Planck que llenan su volumen.

Éste fue el primer indicio de holografía —capacidad de almacenamiento de información determinada por el área de una superficie frontera y no por el volumen interior a dicha superficie—. Con giros y matizaciones durante las tres décadas posteriores, este indicio evolucionaría hasta dar una espectacular y nueva forma de pensamiento sobre las leyes de la física.

Localizando la información oculta en un agujero negro

El tablero de ajedrez planckiano con 0 y 1 desperdigados a lo largo del horizonte de sucesos, Figura 9.2, es una ilustración

simbólica del resultado de Hawking para la cantidad de información que alberga un agujero negro. Pero ¿hasta qué punto es literal esta imagen? Cuando las matemáticas dicen que la información almacenada en un agujero negro se mide por el área de su superficie, ¿refleja eso meramente un recuento numérico, o significa que es en la superficie del agujero negro donde realmente está almacenada la información?

Es una pregunta profunda y durante décadas ha sido objetivo de algunos de los físicos más reputados.[143] La respuesta depende sensiblemente de si se ve el agujero negro desde el exterior o desde el interior; y desde el exterior, hay buenas razones para creer que la información está realmente almacenada en el horizonte.

Para cualquiera familiarizado con los detalles más finos del modo en que la relatividad general describe los agujeros negros, ésta es una afirmación sorprendentemente extraña. La relatividad general deja claro que si usted cayera a través del horizonte de sucesos de un agujero negro, no encontraría nada —ninguna superficie material, ninguna señal indicadora, ninguna luz intermitente— que marcara de alguna forma su cruce de la frontera de no retorno. Es una conclusión que se deduce de una de las ideas más simples pero más capitales de Einstein. Éste se dio cuenta de que cuando usted (o cualquier objeto) entra en movimiento de caída libre, queda ingrávido; si salta desde un trampolín con una báscula acoplada a sus pies, la báscula cae con usted y por ello su lectura es cero. De hecho, usted neutraliza la gravedad al abandonarse a ella por completo. A partir de esto, Einstein saltó a una consecuencia inmediata. Basado en lo que experimenta en su entorno inmediato, usted no tiene manera de distinguir entre estar en caída libre hacia un objeto masivo y flotar libremente en las profundidades del espacio vacío: en ambas situaciones está completamente ingrávido. Por supuesto, si usted mira más allá de su entorno inmediato y ve, digamos,

que la superficie de la Tierra se acerca rápidamente, eso es una buena señal de que haría bien en tirar de la anilla del paracaídas. Pero si usted está confinado en una pequeña cápsula sin ventanas, las experiencias de la caída libre y la flotación libre son indistinguibles.[144]

En los primeros años del siglo XX, Einstein captó está sencilla pero profunda interrelación entre movimiento y gravedad; y tras una década de elaboración, sacó partido de ella en su teoría de la relatividad general. Nuestra aplicación aquí es más modesta. Supongamos que usted está en dicha cápsula y en caída libre no hacia la Tierra, sino hacia un agujero negro. El mismo razonamiento asegura que su experiencia no será diferente en modo alguno de flotar en el espacio vacío. Y eso significa que nada especial o inusual sucederá cuando usted atraviese en caída libre el horizonte de sucesos del agujero negro. Cuando dé finalmente en el centro del agujero negro, ya no estará en caída libre, y esa experiencia ciertamente se distinguirá. Y lo hará de forma espectacular. Pero hasta entonces, es igual que si estuviera flotando sin objetivo en las oscuras profundidades del espacio exterior.

Esta idea hace todavía más enigmática la entropía del agujero negro. Si cuando usted atraviesa el horizonte de un agujero negro no encuentra nada en absoluto que lo distinga del espacio vacío, ¿cómo puede almacenar información?

Una respuesta que ha ganado atractivo durante la última década resuena con el tema de la dualidad que hemos encontrado en los primeros capítulos. Recordemos que la dualidad se refiere a una situación en la que hay perspectivas complementarias que parecen totalmente diferentes, y pese a todo están íntimamente conectadas a través de un ancla física compartida. La imagen de Albert-Marilyn de la Figura 5.2 ofrece una buena metáfora visual: ejemplos matemáticos proceden de las formas especulares de las dimensiones extra de la teoría de cuerdas (ca-

pítulo 4) y las ingenuamente distintas pero duales teorías de cuerdas (capítulo 5). En años recientes, investigadores dirigidos por Susskind han comprendido que los agujeros negros presentan otro contexto en el que perspectivas complementarias pero ampliamente divergentes dan ideas fundamentales.

Una perspectiva esencial es la que tiene usted conforme cae libremente hacia un agujero negro. Otra es la de un observador distante, que le observa a través de un potente telescopio. Lo notable es que cuando usted atraviesa inadvertidamente el horizonte de un agujero negro, el observador distante percibe una secuencia de sucesos muy diferente. La discrepancia tiene que ver con la radiación de Hawking del agujero negro.[145] Cuando el observador distante mide la temperatura de la radiación de Hawking, encuentra que es minúscula; digamos que es 10^{-13} K, lo que indica que el agujero negro es aproximadamente del tamaño del agujero que hay en el centro de nuestra galaxia. Pero el observador distante sabe que la radiación es fría sólo porque los fotones, que viajan hasta él desde fuera del horizonte, han gastado su energía luchando valientemente contra la atracción gravitatoria del agujero negro; en la descripción que he dado antes, los fotones están cansados. Él deduce que conforme usted se acerca cada vez más al horizonte del agujero negro, encontrará fotones cada vez más recientes, fotones que acaban de empezar su viaje y por ello son cada vez más energéticos y cada vez más calientes. De hecho, cuando él observa que usted se ha acercado a una distancia del grosor de un cabello del horizonte, él ve su cuerpo bombardeado por una radiación de Hawking cada vez más intensa, hasta que finalmente todo lo que queda son sus restos achicharrados.

Felizmente, sin embargo, lo que usted experimenta es mucho más agradable. Usted no ve ni siente ni obtiene de ninguna otra manera ninguna prueba de esta radiación caliente. De nuevo, puesto que su movimiento en caída libre anula el efecto de la

gravedad,[146] su experiencia es indistinguible de la de flotar en el espacio vacío. Y algo que sabemos con certeza es que cuando usted flota en el espacio vacío, no arde en llamas repentinamente. De modo que la conclusión es que, desde su perspectiva, usted atraviesa incólume el horizonte y (lo que ya no es tan feliz) se dirige hacia la singularidad del agujero negro, mientras que desde la perspectiva del observador distante, usted se inmola en una corona abrasadora que rodea al horizonte.

¿Cuál es la perspectiva correcta? La afirmación avanzada por Susskind y otros es que las dos lo son. Por supuesto, esto es difícil de cuadrar con la lógica ordinaria —la lógica según la cual usted está vivo *o* no está vivo—. Pero ésta no es una situación ordinaria. Y, lo que es más destacable, las perspectivas tremendamente diferentes nunca pueden confrontarse. Usted no puede salir del agujero negro y mostrar al observador distante que está vivo. Y el observador distante no puede saltar al interior del agujero negro y confrontarle con la evidencia de que usted no lo está. Cuando dije que el observador distante «ve» que usted se inmola en la radiación de Hawking del agujero negro, eso era una simplificación. El observador distante, examinando detalladamente la radiación cansada que le llega, puede reconstruir la historia de su muerte en llamas. Pero para que le llegue la información se necesita tiempo. Y las matemáticas muestran que en el momento en que él puede concluir que usted se ha quemado, no le quedará tiempo suficiente para saltar al agujero negro y alcanzarle antes de que usted sea destruido en la singularidad. Las perspectivas pueden diferir, pero la física tiene incorporado un seguro contra paradojas.

¿Qué pasa con la información? Desde su perspectiva, toda su información, almacenada en su cuerpo y cerebro y en el ordenador portátil que usted mantiene, muere con usted cuando atraviesa el horizonte del agujero negro. Desde la perspectiva del observador distante, toda la información que usted lleva es

absorbida por la capa de radiación que rebosa sin cesar justo por encima del horizonte. Los bits contenidos en su cuerpo, cerebro y ordenador portátil serían preservados, pero se harían completamente desordenados cuando se juntaran, chocaran y entremezclaran con el horizonte caliente. Lo que significa que para el observador distante el horizonte de sucesos es un lugar real, poblado por cosas reales que dan expresión física a la información simbólicamente representada en el tablero de ajedrez, Figura 9.2.

La conclusión es que el observador distante —nosotros— infiere que la entropía de un agujero negro está determinada por el área de su horizonte porque es en el horizonte donde está almacenada la energía. Dicho así, parece totalmente razonable. Pero no perdamos de vista lo inesperado que resulta que la capacidad de almacenamiento no esté fijada por el volumen del agujero negro. Y, como veremos ahora, este resultado no ilustra simplemente una característica peculiar de los agujeros negros. Los agujeros negros no sólo nos hablan de cómo almacenan información los agujeros negros. Los agujeros negros nos informan sobre el almacenamiento de información en cualquier contexto. Esto allana una ruta directa hacia la perspectiva holográfica.

Más allá de los agujeros negros

Consideremos cualquier objeto o colección de objetos —las colecciones de la Biblioteca del Congreso, todos los computadores de Google, los archivos de la CIA— situados en una región del espacio. Por facilidad, imaginemos que resaltamos la región rodeándola con una esfera imaginaria, como en la Figu-

ra 9.3a. Supongamos además que la masa total de los objetos, comparada con el volumen que llenan, es de una magnitud tan poco destacable que en modo alguno se acerca a la que se necesita para crear un agujero negro. Ése es el montaje. Ahora viene la pregunta central: ¿cuál es la máxima cantidad de información que puede almacenarse dentro de la región del espacio? [147]

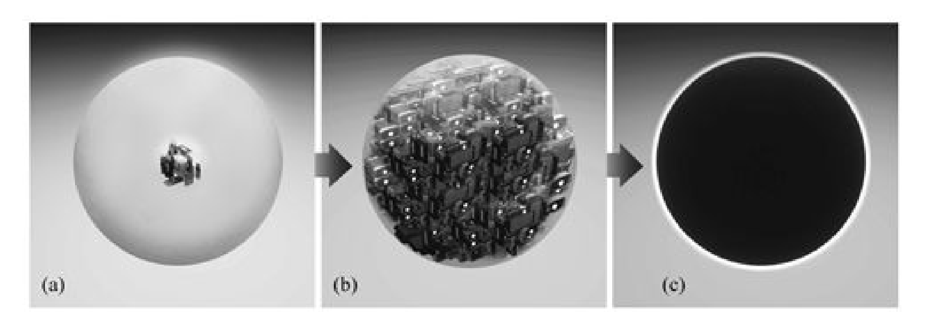


FIGURA 9.3. (a) Una variedad de objetos que almacenan información, situada dentro de una región bien definida del espacio. (b) Aumentamos la capacidad de la región para almacenar información. (c) Cuando la cantidad de materia cruza un umbral (cuyo valor puede calcularse a partir de la relatividad general), la región se convierte en un agujero negro.

Esos improbables compañeros de cama, la segunda ley y los agujeros negros, proporcionan la respuesta. Imaginemos que se añade materia a la región, con el objetivo de aumentar su capacidad de almacenamiento de información. Usted podría insertar chips de memoria de gran capacidad o los voluminosos discos duros en el banco de computadores de Google; podría proporcionar libros o montones de Kindles para aumentar la colección de la Biblioteca del Congreso. Puesto que incluso la materia en bruto lleva información —las moléculas de vapor, ¿están aquí o allí?, ¿se mueven a esta velocidad o a ésa?—, usted también llena cada rincón y grieta de la región con tanta materia como puede conseguir. Hasta que llega a una coyuntura crítica.

En algún momento, la región estará tan completamente abarrotada que si usted añadiera siquiera un grano de arena, la región se convertiría en un agujero negro y el interior se oscurecería. Cuando eso sucede, el juego ha terminado. El tamaño de un agujero negro está determinado por su masa, de modo que si usted trata de aumentar la capacidad de almacenamiento de información añadiendo aún más materia, el agujero negro responderá haciéndose más grande. Y puesto que queremos centrarnos en la información que puede haber en un volumen *fijo* de espacio, este resultado entra en conflicto con el montaje básico. Usted no puede aumentar la capacidad de información sin obligar a agrandarse al agujero negro.[148]

Dos observaciones nos llevan a la línea final. La segunda ley asegura que la entropía aumenta a lo largo de todo el proceso, y por eso la información oculta dentro de los discos duros, Kindles, libros de papel al modo clásico y cualquier otra cosa que usted pusiera en la región es menor que la oculta en el agujero negro. De los resultados de Bekenstein y Hawking sabemos que el contenido de información oculta del agujero negro está dado por el área de su horizonte de sucesos. Además, puesto que usted tuvo cuidado de no sobresaturar la región original del espacio, el horizonte de sucesos del agujero negro coincide con la frontera de la región, de modo que la entropía del agujero negro es igual al área de esta superficie circundante. Aprendemos así una lección importante. *La cantidad de información contenida dentro de una región de espacio, almacenada en cualesquiera objetos de cualquier diseño, es siempre menor que el área de la superficie que rodea a la región (medida en unidades de Planck al cuadrado).*

Ésta es la conclusión que hemos estado persiguiendo. Nótese que aunque los agujeros negros son centrales para el razonamiento, el análisis se aplica a cualquier región del espacio, haya o no haya realmente presente un agujero negro. Si usted maximiza la capacidad de almacenamiento de una región, creará un

agujero negro, pero mientras usted se quede por debajo del límite, no se formará ningún agujero negro.

Me apresuro a añadir que, en cualquier sentido práctico, el límite de almacenamiento de información no tiene importancia. Comparado con los rudimentarios dispositivos de almacenamiento de hoy, la capacidad de almacenamiento potencial en la superficie de una región espacial es enorme. Una pila de cinco discos duros de un terabit, como los que hoy hay en el mercado, encaja cómodamente dentro de una esfera de cincuenta centímetros de radio, cuya superficie está cubierta por unas 10^{70} celdas de Planck. La capacidad de almacenamiento de la superficie es entonces de unos 10^{70} bits, que es aproximadamente mil millones de billones de billones de billones de billones de terabits, y por ello supera enormemente cualquier cosa que usted pueda comprar. A nadie en Silicon Valley le preocupan mucho estas restricciones teóricas.

Pese a todo, como guía del funcionamiento del universo, las limitaciones de almacenamiento son reveladoras. Consideremos cualquier región del espacio, tal como la habitación en la que yo estoy escribiendo o la habitación en la que usted está leyendo. Adoptemos una perspectiva wheeleriana e imaginemos que cualquier cosa que sucede equivale a procesamiento de información: la información con respecto a cómo son las cosas precisamente ahora es transformada por las leyes de la física en información con respecto a cómo serán dentro de un segundo o un minuto o una hora. Puesto que los procesos físicos de los que somos testigos, así como aquellos por los que estamos gobernados, tienen lugar aparentemente dentro de la región, es natural esperar que la información que llevan estos procesos se encuentre también dentro de la región. Pero los resultados recién derivados sugieren una visión alternativa. En el caso de los agujeros negros, encontramos que el vínculo entre información y área de la superficie va más allá del mero recuento numérico;

hay un sentido concreto en el que la información está almacenada en sus superficies. Susskind y 'T Hooft resaltaron que la lección debería ser general: puesto que la información requerida para describir fenómenos físicos generales dentro de *cualquier* región dada del espacio puede ser codificada completamente por datos en una superficie que rodea a la región, hay razones para pensar que es en la superficie donde suceden realmente los procesos físicos fundamentales. Nuestra realidad tridimensional familiar, sugerían estos audaces pensadores, se asemejaría entonces a una proyección holográfica de esos lejanos procesos físicos bidimensionales.

Si esta línea de razonamiento es correcta, entonces hay procesos físicos que tienen lugar en una superficie distante que, de la misma forma en que un marionetista tira de las cuerdas, están completamente vinculados con los procesos que tienen lugar en mis dedos, brazos y cerebro cuando tecleo estas palabras en mi mesa de trabajo. Nuestras experiencias aquí, y esa realidad distante allí, formarían los mundos paralelos más interconectados. Los fenómenos en los dos —les llamaré *universos paralelos holográficos*— estarían tan plenamente unidos que sus respectivas evoluciones estarían tan conectadas como mi sombra y yo.

La letra pequeña

Que la realidad familiar puede ser reflejada, o quizá incluso producida, por fenómenos que tienen lugar en una superficie remota de menor dimensión figura entre los desarrollos más inesperados de la física teórica. Pero ¿hasta qué punto podemos confiar en que el principio holográfico es correcto? Esta-

mos explorando un dominio profundo en territorio teórico, y basándonos casi exclusivamente en desarrollos que no han sido puestos a prueba experimentalmente, de modo que ciertamente hay base para el escepticismo. Hay muchos lugares en donde el argumento podría ser salirse de la ruta. ¿Realmente los agujeros negros tienen entropía no nula y temperatura no nula, y si es así, se ajustan los valores a las predicciones teóricas? ¿Realmente la capacidad de información de una región del espacio está determinada por la cantidad de información que puede almacenarse en una superficie que la rodea? Y en dicha superficie, ¿realmente el límite es un bit por área de Planck? Creemos que la respuesta a cada una de estas preguntas es sí, debido al edificio teórico coherente, consistente y cuidadosamente construido en el que las conclusiones encajan perfectamente. Pero puesto que ninguna de estas ideas ha sido sometida al escalpelo del experimentador, es ciertamente posible (aunque en mi opinión bastante improbable) que avances futuros nos convencerán de que uno más de estos pasos intermedios están equivocados. Eso podría tirar a la basura la idea holográfica.

Otro punto importante es que a lo largo de la discusión hemos hablado de una región del espacio, de una superficie que la rodea y del contenido de información de cada una de ellas. Pero puesto que nos hemos centrado en la entropía y la segunda ley —ambas conciernen principalmente a la *cantidad* de información en un contexto dado—, no hemos desarrollado los detalles de cómo esa información se realiza o se almacena físicamente. Cuando decimos que la información reside en una superficie esférica que rodea a una región del espacio, ¿qué queremos decir realmente? ¿Cómo se manifiesta la información? ¿Qué forma toma? ¿Hasta qué punto podemos desarrollar un diccionario explícito que traduzca desde los fenómenos que tienen lugar en la frontera hasta los que tienen lugar en su interior?

Los físicos aún tienen que articular un marco general para abordar estas preguntas. Dado que la gravedad y la mecánica cuántica son fundamentales para el razonamiento, cabría esperar que la teoría de cuerdas proporcionara un poderoso contexto para exploraciones teóricas. Pero cuando 'T Hooft formuló por primera vez el concepto holográfico, planteó sus dudas de que la teoría de cuerdas fuera capaz de hacer avances en el tema, pues como él decía «la Naturaleza es mucho más loca en la escala de Planck que lo que incluso los teóricos de cuerdas podrían haber imaginado».[149] Menos de una década más tarde, la teoría de cuerdas mostró que 'T Hooft estaba equivocado al demostrar que tenía razón. En un artículo señero, un joven teórico demostró que la teoría de cuerdas proporciona una realización explícita del principio holográfico.

Teoría de cuerdas y holografía

Cuando fui llamado al estrado en la Universidad de California en Santa Barbara para dar mi charla en la conferencia anual internacional sobre teoría de cuerdas en 1998, hice algo que no había hecho nunca antes y sospecho que nunca volveré a hacer. Me puse de cara a la audiencia, llevé mi mano derecha a mi hombro izquierdo y mi mano izquierda a mi hombro derecho, luego puse una mano tras otra en mi trasero, di un salto de conejo, y giré un cuarto de vuelta, lo que provocó, gracias a Dios, las risas de la audiencia, que cubrieron los tres pasos que me faltaban para llegar al podio, donde empecé mi charla. La multitud captó la broma. En la cena de la noche anterior, los participantes en la conferencia habían cantado y bailado para celebrar —como sólo los físicos pueden hacerlo— un resultado espec-

tacular del teórico de cuerdas argentino Juan Maldacena. Con una letra que decía «Los agujeros negros un gran misterio suponían; / ahora utilizamos D-branas para calcular D-entropía», la multitud se divertía con una versión de teoría de cuerdas del baile de moda de los años noventa, la «Macarena» —un poco más animada que la versión de Al Gore en la Convención Nacional Demócrata, un poco menos meliflua que el extraordinario *hit* de Los del Río, pero por encima de todas en pasión—. Yo fui uno de los pocos en la conferencia cuya charla no se centró en el importantísimo avance de Maldacena, de modo que cuando subí al estrado la mañana siguiente creí adecuado prologar mis comentarios con un gesto personal de aprecio.

Ahora, más de una década después, muchos estarían de acuerdo en que desde entonces no ha habido ningún trabajo en teoría de cuerdas que se le pueda comparar en magnitud e influencia. De las numerosas ramificaciones del resultado de Maldacena, una es directamente relevante para la línea que hemos estado siguiendo. El resultado de Maldacena *realizaba explícitamente el principio holográfico, y al hacerlo proporcionaba el primer ejemplo matemático de universos paralelos holográficos*. Maldacena lo conseguía considerando teoría de cuerdas en un universo cuya forma difiere de la del nuestro pero que, para nuestro objetivo presente, se muestra más fácil de analizar. En un sentido matemático preciso, la forma tiene una frontera, una superficie impenetrable que rodea por completo su interior. Pero centrándose en esta superficie, Maldacena argumentaba convincentemente que todo lo que tiene lugar dentro del universo especificado es un reflejo de leyes y procesos que actúan en la frontera.

Aunque el método de Maldacena quizá no sea directamente aplicable a un universo con la forma del nuestro, sus resultados son decisivos porque establecían un terreno de pruebas matemático en donde ideas relativas a universos holográficos podían hacerse explícitas y ser investigadas cuantitativamente. Los

resultados de tales estudios se ganaron el apoyo de muchos físicos que previamente habían visto el principio holográfico con mucho recelo, y con ello desencadenaron una avalancha de investigación que ha generado miles de artículos y un conocimiento mucho más profundo. Y, lo que es más excitante, hay ahora evidencia de que puede forjarse un vínculo entre estas ideas teóricas y la física en nuestro universo. En los próximos años, este vínculo muy bien puede permitir que las ideas holográficas se pongan a prueba experimentalmente.

El resto de esta sección y la siguiente se dedicarán a explicar cómo Maldacena consiguió este avance trascendental; es el material más difícil que cubriremos. Empezaré con un breve resumen que sirve como salvoconducto para saltar a la última sección si en algún momento el material saciara su apetito por el detalle.

La jugada inspirada de Maldacena consistía en invocar una nueva versión de los argumentos de dualidad discutidos en el capítulo 5. Recordemos las branas —los universos «rebanada de pan»— introducidos allí. Maldacena consideró desde dos perspectivas complementarias las propiedades de una colección estrechamente apretada de branas tridimensionales, como en la Figura 9.4. Una perspectiva «intrínseca» se centraba en cuerdas que se mueven, vibran y oscilan a lo largo de las propias branas. La otra perspectiva, una perspectiva «extrínseca», se centraba en cómo influyen las branas gravitatoriamente en su entorno inmediato, igual que el Sol y la Tierra influyen en los suyos. Maldacena argumentaba que ambas perspectivas describen una y la misma situación física, sólo que desde diferentes puntos de vista. La perspectiva intrínseca incluye cuerdas que se mueven en un conjunto apretado de branas, mientras que la perspectiva extrínseca incluye cuerdas que se mueven a través de una región de espacio-tiempo curvo que está acotada por el conjunto de branas. Igualando las dos, Maldacena encontró un vínculo

explícito entre la física que tiene lugar en una región y la física que tiene lugar en la frontera de dicha región; encontró una realización explícita de holografía. Ésa es la idea básica.

Con más color, la historia es la siguiente.

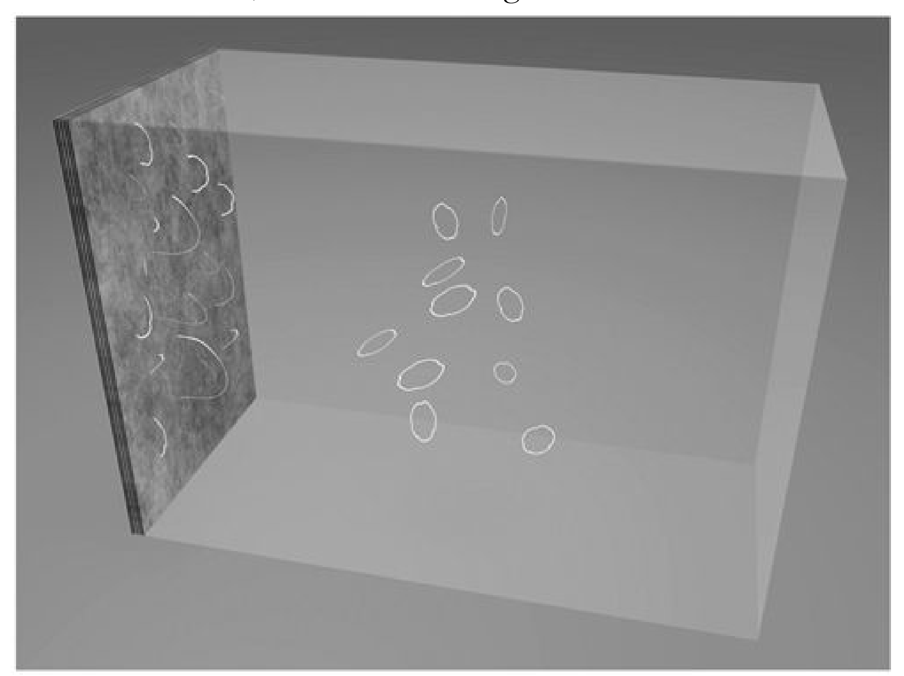


FIGURA 9.4. Una colección de tres-branas estrechamente espaciadas con cuerdas abiertas confinadas a las superficies brana, y cuerdas cerradas que se mueven a través del «volumen».

Consideremos, dice Maldacena, un conjunto de tres-branas, tan próximas que aparecen como una única lámina monolítica —Figura 9.4—, y estudiemos el comportamiento de las cuerdas que se mueven en este entorno. Usted recordará que hay dos tipos de cuerdas —segmentos abiertos y lazos cerrados— y que los puntos extremos de las cuerdas abiertas pueden moverse dentro y a través de branas pero no fuera de ellas, mientras que las cuerdas cerradas no tienen extremos y por ello pueden moverse libremente a través de toda la extensión espacial. En la jerga del campo, decimos que mientras que las cuerdas

abiertas están confinadas en las branas, las cuerdas cerradas pueden atravesar el *volumen* del espacio.

El primer paso de Maldacena fue confinar su atención a las cuerdas que tienen baja energía, es decir, cuerdas que vibran relativamente lentas. He aquí por qué: la fuerza de gravedad entre dos objetos cualesquiera es proporcional a la masa de cada uno de ellos; lo mismo es cierto para la fuerza de gravedad que actúa entre dos cuerdas cualesquiera. Las cuerdas que tienen baja energía tienen masa pequeña, y por ello apenas responden a la gravedad. Al centrarse en cuerdas de baja energía, Maldacena estaba suprimiendo la influencia de la gravedad. Esto daba una simplificación sustancial. En la teoría de cuerdas, como hemos visto (capítulo 5), la gravedad se transmite de un lugar a otro mediante lazos cerrados. Por ello, suprimir la fuerza de gravedad era equivalente a suprimir la influencia de las cuerdas cerradas sobre cualquier cosa con que pudieran tropezar —muy especialmente, los segmentos de cuerdas abiertas que viven en la lámina de branas—. Asegurando que los dos tipos de cuerdas, segmentos abiertos y lazos cerrados, no se afectarían mutuamente, Maldacena estaba asegurando que podían analizarse independientemente.

Maldacena cambió entonces de marcha y sugirió que había que considerar la misma situación desde una perspectiva diferente. Más que tratar las tres-branas como un sustrato que soporta el movimiento de cuerdas abiertas, él animaba a verlas como un único objeto, que tiene su propia masa intrínseca y con ello distorsiona el espacio y el tiempo en su vecindad. Maldacena tuvo la suerte de que investigaciones previas de varios físicos habían asentado el terreno de trabajo para esta perspectiva alternativa. Los trabajos anteriores habían establecido que cuando se juntan cada vez más branas, su campo gravitatorio colectivo se hace cada vez más intenso. Finalmente, la lámina de branas se comporta como un agujero negro, pero uno con

forma de brana, que por ello se denomina una *brana negra*. Como sucede con un agujero negro más ordinario, si usted se acerca demasiado a una brana negra, no puede escapar. Y, como también sucede con un agujero negro ordinario, si usted permanece muy lejos pero está observando algo que se acerca a una brana negra, la luz que usted reciba estará exhausta por su lucha contra la gravedad de la brana negra. Esto hará que el objeto parezca tener menos energía y estar moviéndose cada vez más lento.[150]

Desde esta segunda perspectiva, Maldacena volvió a centrarse en las características de baja energía de un universo que contiene dicha lámina negra. Igual que había hecho cuando trabajaba con la primera perspectiva, él comprendió que la física de baja energía implicaba dos componentes que podían analizarse independientemente. Cuerdas cerradas que vibran lentamente, y que se mueven en cualquier parte del volumen del espacio, son las portadoras más obvias de baja energía. El segundo componente se basa en la presencia de la brana negra. Imagine que usted está lejos de la brana negra y tiene en su posesión una cuerda cerrada que está vibrando con una cantidad de energía arbitrariamente grande. Luego, imagine que deja que la cuerda descienda hacia el horizonte de sucesos mientras usted se mantiene a una distancia segura. Como recordábamos antes, la brana negra hará que la energía de la cuerda aparezca cada vez más baja; la luz que usted reciba hará que parezca que veamos la cuerda como una película a cámara lenta. Así pues, los segundos portadores de baja energía son cada una de las cuerdas vibrantes que están suficientemente próximas al horizonte de sucesos de la brana negra.

La jugada final de Maldacena fue comparar las dos perspectivas. Él advirtió que, puesto que describen el mismo conjunto de branas, sólo que desde diferentes puntos de vista, deben estar de acuerdo. Cada descripción incluye cuerdas cerradas de

baja energía que se mueven a través del volumen del espacio, de modo que esta parte del acuerdo es manifiesta. Pero las partes restantes de cada descripción también deben estar de acuerdo.

Y eso resulta sorprendente.

La parte restante de la primera descripción consiste en cuerdas abiertas de baja energía que se mueven en las tres-branas. Recordemos del capítulo 4 que las cuerdas de baja energía están bien descritas por la teoría cuántica de campos con partículas puntuales, y eso es lo que sucede aquí. El tipo partículas en la teoría cuántica de campos incluye varios ingredientes matemáticos sofisticados (y tiene una difícil caracterización: *teoría cuántica de campos gauge supersimétricos y conformemente invariantes*), pero dos características esenciales son fáciles de entender. La ausencia de cuerdas cerradas garantiza la ausencia de campo gravitatorio. Y, puesto que las cuerdas pueden moverse solamente en las branas tridimensionales fuertemente emparedadas, la teoría cuántica de campos vive en tres dimensiones espaciales (además de la dimensión del tiempo, lo que da un total de cuatro dimensiones espacio-temporales).

La parte restante de la segunda descripción consiste en cuerdas cerradas, que ejecutan cualquier pauta vibracional, siempre que estén suficientemente cerca del horizonte de sucesos de las branas negras para parecer aletargadas, es decir, para que parezcan tener baja energía. Estas cuerdas, aunque limitadas por su lejanía a la lámina negra, siguen vibrando y moviéndose a través de nueve dimensiones de espacio (además de la dimensión de tiempo, para dar un total de diez dimensiones espacio-temporales). Y puesto que este sector está hecho de cuerdas cerradas, contiene la fuerza de la gravedad.

Por diferentes que puedan parecer las dos perspectivas, ambas están describiendo la misma situación física, de modo que

deben estar de acuerdo. Esto lleva a una conclusión completamente extraña. Una teoría cuántica de campos de *partículas puntuales, sin gravitación*, en cuatro dimensiones espacio-temporales (la primera perspectiva) describe la misma física que *cuerdas, que incluyen la gravedad*, que se mueven a través de una banda de *diez* dimensiones espacio-temporales (la segunda perspectiva). Esto parecería tan inverosímil como afirmar… Bien, honestamente, lo he intentado y no he podido dar con dos cosas en el mundo real que sean más diferentes que estas dos teorías. Pero Maldacena siguió las matemáticas de la manera que hemos subrayado, y tropezó con esta conclusión.

La abierta extrañeza del resultado —y la audacia de la afirmación— no se atenúan por el hecho de que enseguida se puede colocar dentro de la línea de pensamiento desarrollada antes en este capítulo. Como se ilustra esquemáticamente en la Figura 9.5, la gravedad de la lámina de branas negras imparte una forma curva a la banda espaciotemporal decadimensional en su vecindad (los detalles son secundarios, pero el espacio-tiempo curvo se denomina *producto de un cinco-espacio anti-de Sitter por la cinco-esfera*); la propia lámina de branas negras es la frontera de este espacio. Y por ello, el resultado de Maldacena es que la teoría de cuerdas dentro del *volumen* de esta forma espacio-temporal es idéntica a una teoría cuántica de campos que vive en su *frontera*.[151]

Esto es holografía que cobra vida.

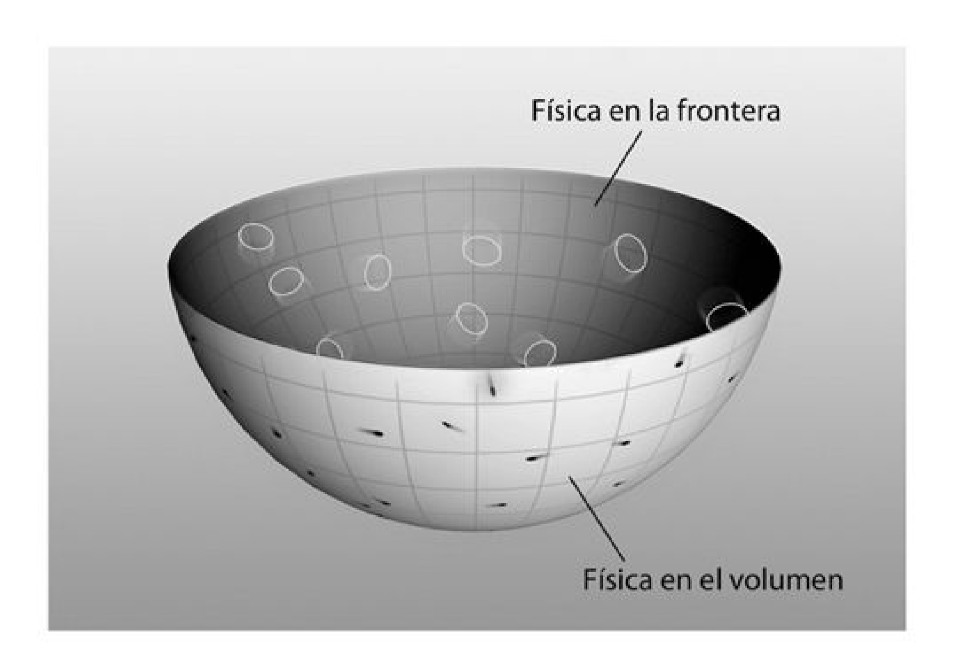


FIGURA 9.5. Una ilustración esquemática de la dualidad entre teoría de cuerdas que actúa en el interior de un espacio-tiempo particular y teoría cuántica de campos en la frontera de dicho espacio-tiempo.

Maldacena había construido un laboratorio matemático autocontenido en donde, entre otras cosas, los físicos podían explorar en detalle una realización holográfica de la ley física. En pocos meses, dos artículos, uno de Edward Witten y otro de Steven Gubser, Igor Klebanov y Alexander Polyakov, suministraron el siguiente nivel de comprensión. Ellos establecieron un diccionario matemático preciso para traducir entre las dos perspectivas: dado un proceso físico en la brana frontera, el diccionario mostraba cómo aparecería en el interior del volumen, y viceversa. Entonces, en un universo hipotético el diccionario haría explícito el principio holográfico. En la frontera de este universo la información está encarnada por campos cuánticos. Cuando la información es traducida por el diccionario matemático, se lee una historia de fenómenos de cuerdas que suceden en el interior del universo.

El propio diccionario hace más adecuada la metáfora holográfica. Un holograma ordinario no guarda ningún parecido con la imagen tridimensional que lo produce. En su superficie solamente aparecen líneas, arcos y espirales grabados en el plástico. Pero una compleja transformación, que se realiza operacionalmente lanzando un haz láser a través del plástico, convierte estas marcas en una imagen tridimensional reconocible. Lo que significa que el holograma plástico y la imagen tridimensional encarnan los mismos datos, incluso si la información en uno es irreconocible desde la perspectiva de la otra. Análogamente, el examen de la teoría cuántica de campos en la frontera del universo de Maldacena muestra que no guarda ningún parecido obvio con la teoría de cuerdas que habita en el interior. Sin embargo, el diccionario matemático que liga las dos —que funciona como lo hace un láser para los hologramas ordinarios— hace explícito que algo que tiene lugar en una tiene una encarnación en la otra. Al mismo tiempo, un examen del diccionario revela que lo mismo que sucede con un holograma real, la información en cada una aparece revuelta en la traducción al lenguaje de la otra.

Como ejemplo especialmente impresionante, Witten investigó cómo se vería un agujero negro ordinario en el interior del universo de Maldacena desde la perspectiva de la teoría en la frontera. Recuerde que la teoría de la frontera no incluye la gravedad, y por ello un agujero negro se traduce necesariamente en algo que se parece muy poco a un agujero negro. El resultado de Witten mostraba que igual que el rostro aterrador del mago de Oz estaba producido por un hombre normal, un agujero negro voraz es la proyección holográfica de algo igualmente ordinario: un baño de partículas calientes en la teoría de la frontera (Figura 9.6). Como un holograma real y la imagen que genera, las dos teorías —un agujero negro en el interior y una teoría cuántica de campos caliente en la frontera— no guardan

ningún parecido evidente entre sí, y pese a todo encarnan una información idéntica.[152]

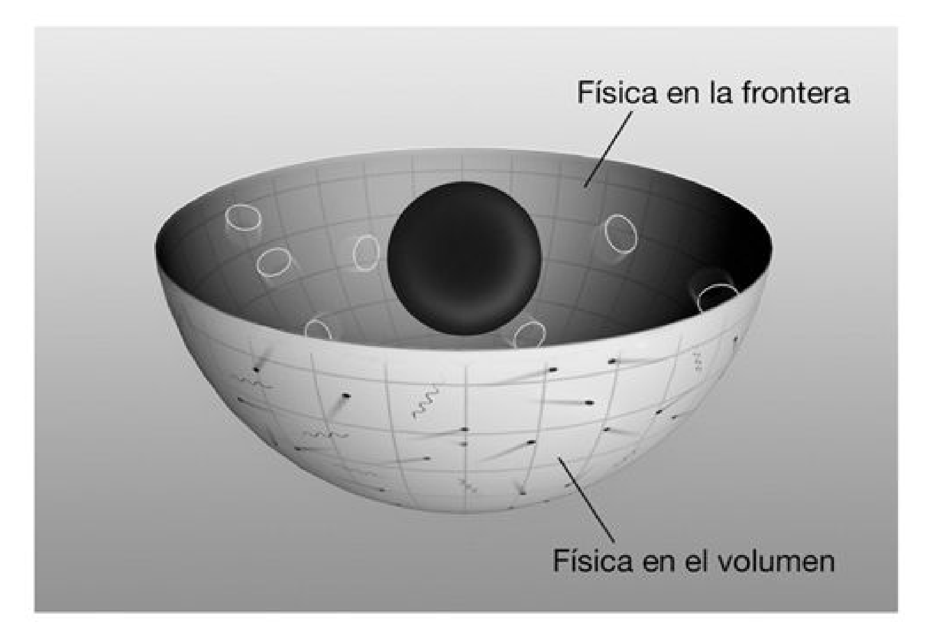


FIGURA 9.6. La equivalencia holográfica aplicada a un agujero negro en el volumen del espacio-tiempo da un baño caliente de partículas y radiación en la frontera de la región.

En la parábola de la caverna de Platón, nuestros sentidos están limitados a una versión disminuida y aplanada de una realidad verdadera de textura más rica. El mundo aplanado de Maldacena es muy diferente. Lejos de estar disminuido, nos cuenta toda la historia. Es una historia profundamente diferente de la historia a la que estamos acostumbrados. Pero su mundo aplanado podría ser muy bien el narrador principal.

¿Universos paralelos o matemáticas paralelas?

El resultado de Maldacena, y muchos otros que ha generado desde entonces, se estima conjetural. Puesto que las matemáticas son tremendamente difíciles, construir un argumento incuestionable sigue siendo elusivo. Pero las ideas holográficas han sido sometidas a muchos tests matemáticos severos; y al haberlos superado, se han introducido en la corriente de pensamiento entre físicos que buscan las raíces profundas de las leyes naturales.

Un factor que contribuye a la dificultad de demostrar rigurosamente que los mundos frontera y volumen son versiones enmascaradas uno de otro ilustra por qué el resultado, si resulta verdadero, es tan potente. En el capítulo 5 describí cómo los físicos se basan muchas veces en técnicas de aproximación, los métodos perturbativos que esbocé (recuerde el ejemplo de la lotería con Rafael y Alicia). También resalté que tales métodos sólo son aproximados si la constante de acoplamiento relevante es un número pequeño. Al analizar la relación entre la teoría cuántica de campos en la frontera y la teoría de cuerdas en el volumen, Maldacena se dio cuenta de que cuando el acoplamiento de una teoría era pequeño, el de la otra era grande, y viceversa. El test natural, y un posible medio de probar que las dos teorías son secretamente idénticas, es realizar cálculos independientes en cada teoría y luego comprobar la igualdad. Pero esto es difícil de hacer, puesto que cuando los métodos perturbativos funcionan para una, fallan para la otra.[153]

Sin embargo, si se acepta el argumento más abstracto de Maldacena, como se ha esbozado en la sección anterior, el vicio perturbativo se convierte en una virtud de cálculo. Como encontramos en las dualidades de cuerdas en el capítulo 5, el diccionario volumen-frontera traduce temibles cálculos en un marco, generados por un acoplamiento grande, en cálculos simples, con un acoplamiento pequeño, en el otro. En años re-

cientes esto ha dado resultados que pueden ser puestos a prueba experimentalmente.

En el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC) en Brookhaven, Nueva York, se hacen chocar núcleos de oro a casi la velocidad de la luz. Puesto que los núcleos contienen muchos protones y neutrones, las colisiones crean un tumulto de partículas que pueden estar doscientas mil veces más calientes que el núcleo del Sol. Eso es suficientemente caliente para fundir los protones y neutrones en un fluido de quarks y los gluones que actúan entre ellos. Los físicos se han esforzado en entender esta fase de tipo fluido, llamada *plasma quark-gluón*, porque es probable que la materia adoptara brevemente esta forma inmediatamente después del big bang.

El problema es que la teoría cuántica de campos (*cromodinámica cuántica*) que describe la sopa caliente de quarks y gluones tiene un valor grande para su constante de acoplamiento, y eso compromete la exactitud de los métodos perturbativos. Se han desarrollado técnicas ingeniosas para salvar este escollo, pero las medidas experimentales siguen contradiciendo algunos de los resultados teóricos. Por ejemplo, como en cualquier fluido —sea agua, melaza o el plasma quark-gluón—, cada capa del fluido ejerce una fuerza de arrastre sobre las capas que fluyen por encima y por debajo. La fuerza de arrastre se conoce como *viscosidad de cizalla*. Experimentos en el RHIC midieron la viscosidad de cizalla del plasma quark-gluón, y los resultados son mucho menores que los que predicen los cálculos perturbativos en teoría cuántica de campos.

He aquí una posible vía de avance. Al introducir el principio holográfico, la perspectiva que he asumido es imaginar que todo lo que experimentamos se encuentra en el interior del espacio-tiempo, con el matiz inesperado de que hay procesos que reflejan dichas experiencias y que tienen lugar en una frontera lejana. Invirtamos la perspectiva. Imaginemos que nuestro uni-

verso —o, para ser más precisos, los quarks y gluones en nuestro universo— vive en la frontera, y ahí es donde tienen lugar los experimentos del RHIC. Ahora invocamos a Maldacena. Su resultado muestra que los experimentos del RHIC (descritos por la teoría cuántica de campos) tienen una descripción matemática alternativa en términos de cuerdas que se mueven en el volumen. Los detalles son complicados, pero la potencia de la paráfrasis es inmediata: cálculos difíciles en la descripción de la frontera (donde el acoplamiento es grande) se traducen en cálculos más fáciles en la descripción del volumen (donde el acoplamiento es pequeño).[154]

Pavel Kovtun, Andrei Starinets y Dam Son hicieron las matemáticas, y los resultados que encontraron eran impresionantemente próximos a los datos experimentales. Este trabajo pionero ha motivado a un ejército de teóricos para emprender muchos más cálculos de teoría de cuerdas en un esfuerzo por tomar contacto con las observaciones en el RHIC, lo que ha impulsado un vigoroso intercambio entre teoría y experimento —una novedad bienvenida por los teóricos de cuerdas—.

Hay que tener en cuenta que la teoría de la frontera no modela nuestro universo por completo porque, por ejemplo, no contiene la fuerza gravitatoria. Esto no compromete el contacto con los datos del RHIC porque en esos experimentos las partículas tienen una masa tan pequeña (incluso cuando viajan a una velocidad próxima a la de la luz) que la fuerza gravitatoria no desempeña prácticamente ningún papel. Pero deja claro que en esta aplicación la teoría de cuerdas no se está utilizando como una «teoría de todo»; más bien, la teoría de cuerdas proporciona una nueva herramienta de cálculo para salvar los obstáculos que bloqueaban los métodos más tradicionales. Siendo conservadores, analizar quarks y gluones utilizando una teoría de cuerdas de más altas dimensiones puede verse como un potente truco matemático basado en cuerdas. Siendo menos conser-

vadores, uno puede imaginar que la descripción mediante cuerdas en dimensiones más altas es, de alguna manera aún no entendida, físicamente real.

Independientemente de la perspectiva, conservadora o no, la confluencia resultante de resultados matemáticos con observaciones experimentales es impresionante en extremo. No me gusta exagerar, pero considero que estos desarrollos son uno de los avances más excitantes en décadas. Manipulaciones matemáticas que utilizan cuerdas que se mueven a través de un espacio-tiempo decadimensional nos dicen algo sobre quarks y gluones que viven en un espacio-tiempo tetradimensional —y el «algo» que nos dicen los cálculos parece estar apoyado por los experimentos.

Coda: el futuro de la teoría de cuerdas

Los desarrollos que hemos cubierto en este capítulo trascienden las evaluaciones de la teoría de cuerdas. Partiendo del énfasis de Wheeler en analizar el universo en términos de información, y pasando por el reconocimiento de que la entropía es una medida de la información oculta, la reconciliación entre la segunda ley de la termodinámica y los agujeros negros, la aceptación de que los agujeros negros almacenan entropía en su superficie y la comprensión de que los agujeros negros fijan un máximo para la cantidad de información que puede ocupar una región dada del espacio, hemos recorrido una ruta sinuosa a lo largo de muchas décadas y hemos atravesado una intrincada madeja de resultados. El viaje ha estado lleno de intuiciones notables, y nos ha llevado a una nueva idea unificadora: el principio holográfico. Dicho principio, como hemos visto, sugiere

que los fenómenos de los que somos testigos tienen reflejo en una fina y distante superficie frontera. Mirando al futuro, sospecho que el principio holográfico será un faro para los físicos bien entrado el siglo XXI.

El que la teoría de cuerdas abarque el principio holográfico y proporcione ejemplos concretos de mundos paralelos holográficos es testimonio de cómo desarrollos de vanguardia se están uniendo en una síntesis poderosa. El que estos ejemplos hayan proporcionado la base para cálculos explícitos, algunos de cuyos resultados pueden compararse con resultados de experimentos en el mundo real, es un paso gratificante hacia la toma de contacto con la realidad observable. Pero dentro de la propia teoría de cuerdas hay un marco más amplio dentro del que deberían verse estos desarrollos.

Durante casi treinta años tras el descubrimiento inicial de la teoría de cuerdas, los físicos carecían de una completa definición matemática de la teoría. Los primeros teóricos de cuerdas sentaron las ideas esenciales de las cuerdas vibrantes y dimensiones extra, pero incluso después de décadas de trabajo posterior, los fundamentos matemáticos de la teoría seguían siendo aproximados e incompletos. La idea de Maldacena representa un avance importante. El tipo de teoría cuántica de campos que Maldacena identificó en la frontera está entre los mejor entendidos matemáticamente por los físicos de partículas que los han estudiado desde mediados del siglo XX. No incluye la gravedad, y eso es un gran plus puesto que, como hemos visto, tratar de unir la relatividad general directamente con la teoría cuántica de campos es como hacer una hoguera en una fábrica de pólvora. Ahora hemos aprendido que esta teoría cuántica de campos, no gravitatoria y matemáticamente amigable, genera de forma holográfica la teoría de cuerdas, una teoría que contiene la gravedad. Operando en la frontera de un universo con la forma específica ilustrada esquemáticamente en la Figura

9.5, esta teoría cuántica de campos incorpora todas las características, los procesos e interacciones físicas de cuerdas que se mueven dentro del interior, un vínculo hecho explícito mediante el diccionario que traduce fenómenos entre las dos. Y puesto que tenemos una firme definición matemática de la teoría cuántica de campos en la frontera, *podemos utilizarla como una definición matemática de la teoría de cuerdas*, al menos para cuerdas que se mueven dentro de esta forma espacio-temporal. Los universos paralelos holográficos pueden ser más que un desarrollo potencial de leyes fundamentales; quizá sean parte de la definición misma de leyes fundamentales.[155]

Cuando introduje la teoría de cuerdas en el capítulo 4, señalé que encaja en la pauta venerable que consiste en proporcionar una nueva aproximación a las leyes de la naturaleza sin que, pese a ello, se borren las teorías pasadas. Los resultados que ahora hemos descrito llevan esta observación a un nivel completamente diferente. La teoría de cuerdas no sólo se reduce a la teoría cuántica de campos en ciertas circunstancias. El resultado de Maldacena sugiere que la teoría de cuerdas y la teoría cuántica de campos son aproximaciones equivalentes expresadas en lenguajes diferentes. La traducción entre ellas es complicada, y por eso es por lo que se necesitaron más de cuarenta años para que esta conexión saliera a la luz. Pero si las ideas de Maldacena son plenamente válidas, como atestigua toda la evidencia disponible, la teoría de cuerdas y la teoría cuántica de campos muy bien pueden ser las dos caras de la misma moneda.

Los físicos trabajan arduamente en generalizar los métodos para que puedan aplicarse a un universo de cualquier forma; si la teoría de cuerdas es correcta, eso incluiría al nuestro. Pero incluso con las limitaciones actuales, tener finalmente una firme formulación de una teoría en la que hemos trabajado durante

muchos años es una base esencial para progresos futuros. Ciertamente, es suficiente para hacer que un físico cante y baile.

10

Universos, computadores y realidad matemática

Los multiversos simulado y final

Las teorías de universos paralelos que consideramos en capítulos anteriores surgían de leyes matemáticas desarrolladas por físicos en su búsqueda del funcionamiento más profundo de la naturaleza. La aceptación de un conjunto de leyes u otro varía ampliamente —la mecánica cuántica se ve como un hecho establecido; la cosmología inflacionaria tiene apoyo observacional; la teoría de cuerdas es totalmente especulativa—, como lo hace el tipo y la necesidad lógica de los mundos paralelos asociados con cada una. Pero la pauta es clara. Cuando pasamos el volante a los cimientos matemáticos de las principales leyes físicas propuestas, nos vemos llevados una y otra vez a alguna versión de mundos paralelos.

Tomemos ahora las riendas. ¿Qué sucede si tomamos el volante? ¿Podemos los seres humanos manipular el despliegue cósmico para crear voluntariamente universos paralelos al nuestro? Si usted cree, como yo, que el comportamiento de los seres vivos está dictado por las leyes de la naturaleza, entonces quizá vea esto no como un cambio de riendas, sino simplemente como un estrechamiento de la perspectiva sobre el impacto de la ley física cuando se canaliza a través de la actividad humana. Esta línea de pensamiento saca a la luz inmediatamente cuestiones espinosas tales como el viejo debate sobre determi-

nismo y libre albedrío, pero no es ésta una dirección en la que quiera ir. Más bien, mi pregunta es ésta: cuando usted elige una película o una comida tiene la sensación de hacerlo con plena premeditación y control, pero ¿podría crear un universo de la misma manera?

La pregunta suena extraña. Y lo es. Le advierto que al abordarla nos encontraremos en un territorio todavía más especulativo que el que ya hemos cubierto, y considerando dónde hemos estado, eso dice mucho. Pero divirtámonos un poco y veamos dónde nos lleva. Déjeme establecer la perspectiva que adoptaré. Al contemplar la creación del universo, estoy menos interesado en las restricciones prácticas que en las posibilidades que permiten las leyes de la física. Así, cuando hablo de «usted» creando un universo, lo que realmente quiero decir es usted, o un descendiente lejano, o un ejército de tales descendientes posiblemente dentro de milenios. Estos seres humanos presentes o futuros aún estarán sometidos a las leyes de la física, pero yo supondré que poseen tecnologías arbitrariamente avanzadas. También consideraré la creación de dos tipos de universos distintos. El primer tipo comprende los universos habituales, universos que abarcan una extensión de espacio y están llenos de varias formas de materia y energía. El segundo tipo es menos tangible: universos virtuales generados por computador. La discusión también forjará de manera natural un vínculo con una tercera propuesta de multiverso. Esta variedad no tiene su origen en el pensamiento sobre la creación del universo, *per se*, sino que aborda la pregunta de si las matemáticas son «reales» o si más bien son creadas por la mente.

Para crear un universo

Pese a las incertidumbres que existen al determinar la composición del universo —¿qué es la energía oscura?, ¿cuál es la lista completa de los ingredientes fundamentales?—, los científicos confían en que si usted midiera la masa de todo lo que hay dentro de nuestro horizonte cósmico, el total sería de unos diez trillones de trillones de trillones de gramos. Si la masa de los contenidos fuera significativamente mayor o menor que esto, su influencia gravitatoria sobre la radiación cósmica de fondo de microondas haría que las manchas en la Figura 3.4 fueran mucho más grandes o mucho más pequeñas, y eso estaría en conflicto con medidas refinadas de su tamaño angular. Pero la masa exacta del universo observable es algo secundario; lo importante es que es enorme. Tan enorme que la idea de nosotros los seres humanos creando otro dominio semejante parece completamente ridícula.

Al utilizar la cosmología del big bang como plano para la construcción del universo, no encontramos ninguna guía que nos diga cómo salvar este obstáculo. En la teoría del big bang estándar, el universo observable era cada vez más pequeño en momentos cada vez más tempranos, pero las enormes cantidades de materia y energía que medimos ahora estaban siempre presentes; simplemente estaban comprimidas en un volumen cada vez más pequeño. Si usted quiere un universo como el que vemos hoy, tiene que empezar con unas materias primas cuya masa y energía son las que vemos hoy. La teoría del big bang toma el material en bruto como algo dado e inexplicado.[156]

A grandes rasgos, las instrucciones del big bang para crear un universo como el nuestro requieren que reunamos una cantidad gigantesca de masa y la comprimamos hasta un tamaño fantásticamente pequeño. Pero habiéndolo conseguido, por improbable que sea, nos enfrentaríamos a otro desafío. ¿Cómo desencadenar el bang? Es un obstáculo que se hace más aterrador cuando recordamos que el big bang no es una explosión

que tiene lugar dentro de una región estática del espacio; el big bang impulsa la expansión del propio espacio.

Si la teoría del big bang fuera la culminación del pensamiento cosmológico, la búsqueda científica de la creación del universo acabaría aquí. Pero no lo es. Hemos visto que la teoría del big bang ha dado paso a la cosmología inflacionaria más sólida, y la inflación ofrece una estrategia para seguir adelante. Siendo su marca registrada un poderoso brote de expansión espacial, la teoría inflacionaria pone un bang en el big bang, y uno bien grande; según la inflación, una onda de choque antigravedad es lo que pone en marcha la expansión del espacio. E igualmente importante, como veremos ahora, la inflación establece que pueden *crearse* inmensas cantidades de materia a partir de las semillas más modestas.

Recordemos del capítulo 3 que en la aproximación inflacionaria un universo como el nuestro —un agujero en el queso gruyer cósmico— se formó cuando el valor del inflatón rodó cuesta abajo en su curva de energía potencial, lo que puso final al tremendo impulso hacia fuera en nuestra vecindad. Cuando cayó el valor del inflatón, la energía que contenía se transformó en un baño de partículas que llenaba uniformemente nuestra burbuja. Ahí es donde se originó la materia que vemos. Eso es un avance, por supuesto, pero la idea plantea la siguiente pregunta: ¿cuál es la fuente de energía del inflatón?

Procede de la gravedad. Recordemos que la expansión inflacionaria es muy similar a la expansión de un virus: un campo inflatón de alto valor impulsa un rápido crecimiento en la región que habita, y al hacerlo crea un volumen espacial cada vez mayor que está él mismo lleno de un campo inflatón de alto valor. Y puesto que un campo inflatón uniforme aporta una energía constante por unidad de volumen, cuanto mayor es el volumen que llena, más energía encarna. La fuerza impulsora tras la expansión es la gravedad —en su faceta repulsiva—, y por eso

la gravedad es la fuente de la energía cada vez mayor que contiene la región.

Así pues, puede considerarse que la cosmología inflacionaria crea un flujo de energía sostenido desde el campo gravitatorio hasta el campo inflatón. Podría parecer que esto es pasar la pelota a la energía —¿de dónde saca la gravedad *su* energía?—, pero la situación es mucho mejor que ésa. La gravedad es diferente de las otras fuerzas, porque donde hay gravedad hay una reserva de energía prácticamente ilimitada. Es una idea familiar expresada en un lenguaje poco familiar. Cuando usted salta desde un acantilado, su energía cinética —la energía de su movimiento— se hace cada vez mayor. La gravedad, la fuerza que impulsa su movimiento, es la fuente de energía. En cualquier situación realista usted dará con el suelo, pero en principio podría caer arbitrariamente lejos dentro de una madriguera cada vez más larga, mientras su energía cinética se hace cada vez mayor. La razón por la que la gravedad puede suministrar esas ilimitadas cantidades de energía es que, como el Tesoro de Estados Unidos, no teme las deudas. Conforme usted cae y su energía se hace cada vez más positiva, la energía de la gravedad se hace cada vez más negativa para compensarlo. Usted sabe intuitivamente que la energía gravitatoria es negativa porque para salir de la madriguera necesita ejercer energía positiva —empujando con sus piernas, tirando con sus brazos; así es como usted salda la deuda de energía en que incurrió la gravedad en su nombre—.[157]

La conclusión esencial es que conforme crece rápidamente una región llena de inflatón, el inflatón extrae energía de los inagotables recursos del campo gravitatorio, lo que da como resultado que la energía de la región también crece rápidamente. Y puesto que el campo inflatón suministra la energía que se convierte en materia ordinaria, la cosmología inflacionaria —a diferencia del modelo del big bang— no necesita postular el

material en bruto para generar planetas, estrellas y galaxias. La gravedad es el camello que provee la materia.

El único presupuesto de energía independiente que requiere la cosmología inflacionaria es el que se necesita para crear una semilla inflacionaria inicial, una pequeña pepita esférica de espacio llena con un campo inflatón de alto valor que pone a rodar la expansión inflacionaria en primer lugar. Cuando se hacen números, las ecuaciones muestran que la pepita sólo tiene que tener 10^{-26} centímetros y estar llena con un campo inflatón cuya energía, cuando se convierte en masa, sería menos de diez gramos.[158] Una semilla tan minúscula experimentaría, más que un *flash*, una expansión espectacular, hasta hacerse mucho más grande que el universo observable al tiempo que alberga una energía en continuo aumento. La energía total del inflatón crecería rápidamente más allá de lo que se necesita para generar todas las estrellas en todas las galaxias que observamos. Y así, con la inflación en el asiento del conductor cosmológico, el imposible punto de partida de la receta del big bang —reunir más de 10^{55} gramos y comprimir el lote completo en una pequeña mota infinitesimal— se transforma radicalmente. Reúna diez gramos de campo inflatón y comprímalos en un grumo de unos 10^{-26} centímetros. Ése es un grumo que usted podría llevar en su billetera.

Sin embargo, esta aproximación presenta problemas que intimidan a cualquiera. Para empezar, el inflatón sigue siendo un campo puramente hipotético. Los cosmólogos incorporan libremente el campo inflatón en sus ecuaciones, pero a diferencia de los campos de electrones y quarks, todavía no hay ninguna evidencia de que el campo inflatón exista. Además, incluso si el inflatón resulta real, e incluso si un día desarrollamos los medios para manipularlo como hacemos con el campo electromagnético, la *densidad* de la semilla del inflatón seguiría siendo enorme, unas 10^{67} veces la de un núcleo atómico. Aunque la se-

milla pesaría menos que un puñado de palomitas de maíz, la fuerza de compresión que habría que aplicar está billones y billones de veces más allá de lo que ahora podemos conseguir.

Pero éste es precisamente el tipo de obstáculo tecnológico que estamos suponiendo que una civilización arbitrariamente avanzada podría superar algún día. Así, si nuestros descendientes lejanos llegan a dominar un día el campo inflatón y desarrollan compresores extraordinarios capaces de producir pepitas tan densas, ¿habremos alcanzado el estatus de creadores de universos? Y, cuando contemplamos ese paso hacia el Olimpo, ¿debería preocuparnos la posibilidad de que al poner en marcha artificialmente nuevos dominios inflacionarios, nuestro rincón del espacio fuera engullido por la extensión que se hincha? Alan Guth y varios colaboradores investigaron estas cuestiones en una serie de artículos, y encontraron buenas y malas noticias. Empecemos por la última pregunta, pues es aquí donde encontraremos las buenas noticias.

Guth, junto con Steven Blau y Eduardo Guendelman, demostró que no tenemos que preocuparnos porque una fase artificial de expansión inflacionaria barra nuestro entorno. La razón tiene que ver con la presión. Si se creara una semilla inflacionaria en el laboratorio, contendría la energía positiva y la presión negativa características del campo inflatón, pero estaría rodeada de espacio ordinario en donde el valor del campo inflatón, y su presión, sería cero (o casi cero).

Normalmente no damos mucho valor al cero, pero en este caso cero marca la diferencia. Presión cero es más que presión negativa, y por eso la presión fuera de la semilla sería mayor que la presión dentro. Esto sometería la semilla a una fuerza externa neta presionando sobre ella, parecida a la que soportan sus tímpanos cuando usted bucea en un mar profundo. El diferencial de presión es suficientemente potente como para impedir que la semilla se expanda en el entorno que la rodea.

Pero esto no anula el impulso para expandirse del inflatón. Si usted sopla aire en un globo mientras aprieta con fuerza su superficie, el globo formará burbujas entre sus manos. La semilla del inflatón puede comportarse del mismo modo. La semilla puede generar un nuevo dominio espacial en expansión que brota del entorno espacial original, como se ilustra por la pequeña esfera creciente en la Figura 10.1. Los cálculos muestran que una vez que el nuevo dominio en expansión alcanza un tamaño crítico, su cordón umbilical con el espacio padre se corta, como en la imagen final de la Figura 10.1, y nace un universo independiente que se infla.

Por atractivo que pueda ser el proceso —*la creación artificial de un nuevo universo*—, la visión desde el laboratorio no satisfaría las expectativas. Es un alivio que la burbuja inflacionaria no engulla el entorno circundante, pero la contrapartida es que habría poca evidencia de la propia creación. Un universo que se expande generando nuevo espacio, que luego se despega del nuestro, es un universo que no podemos ver. De hecho, cuando se estrangula y separa el nuevo universo, su único residuo sería un profundo pozo gravitatorio —puede usted verlo en la última imagen de la Figura 10.1— que se nos presentaría como un agujero negro. Y puesto que no tenemos capacidad de ver más allá del borde de un agujero negro, ni siquiera estaríamos seguros de que nuestro experimento había tenido éxito; sin acceso al nuevo universo no tendríamos medio de establecer observacionalmente que el universo había sido creado.

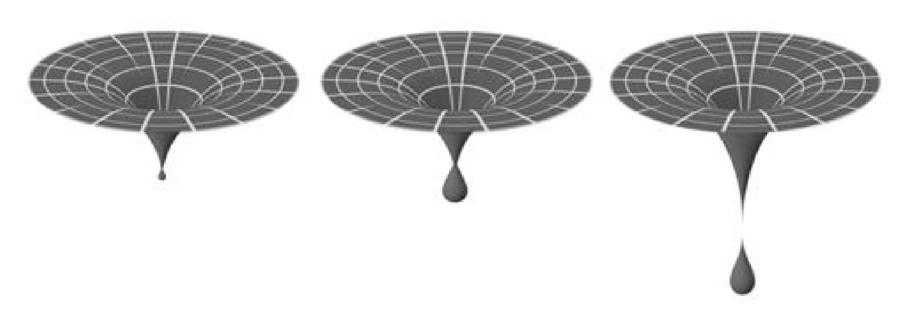


FIGURA 10.1. Debido a la mayor presión en el ambiente circundante, una semilla inflacionaria está forzada a expandirse en un espacio recién formado. Conforme crece el universo burbuja, se separa del ambiente progenitor, lo que da un dominio espacial separado y en expansión. Para alguien en el ambiente circundante, el proceso se parece a la formación de un agujero negro.

La física nos protege, pero el precio a pagar por la seguridad es la separación total de nuestra obra. Y ésas son las buenas noticias.

La mala noticia para los aspirantes a creadores de universos es un resultado menos espectacular obtenido por Guth y su colega del MIT, Edward Farhi. Su cuidadoso tratamiento matemático demostraba que la secuencia representada en la Figura 10.1 requiere un ingrediente adicional. Igual que algunos globos requieren que se les dé un fuerte soplo inicial, después de lo cual son más fáciles de inflar, Guth y Farhi encontraron que el universo naciente en la Figura 10.1 necesita un fuerte golpe inicial para desencadenar y poner en marcha la expansión inflacionaria. Tan fuerte que sólo hay un ente que pueda darlo: un agujero blanco. Un agujero blanco, lo contrario de un agujero negro, es un objeto hipotético que escupe materia en lugar de arrastrarla hacia su interior. Esto requiere condiciones tan extremas que los métodos matemáticos conocidos no valen (como sucede en el centro de un agujero negro); no hace falta decir que nadie prevé generar agujeros negros en el laboratorio. Nunca. Guth y Farhi encontraron un giro fundamental en las obras de creación de universos.

Desde entonces, varios grupos de investigación han sugerido posibles maneras de salvar el problema. Guth y Farhi, a quien se les unió Jemal Guven, encontraron que creando la semilla inflacionaria mediante un proceso de efecto túnel cuántico (similar al que discutimos en el contexto del multiverso paisaje) puede evitarse la singularidad de agujero blanco; pero la proba-

bilidad de que ocurra un proceso de efecto túnel cuántico es tan fantásticamente pequeña que apenas hay posibilidad de que ocurra en escalas de tiempo que valiera la pena contemplar. Un grupo de físicos japoneses, Nobuyuki Sakai, Kenichi Nakao, Hideki Ishihara y Makoto Kobayashi, demostraron que un monopolo magnético —una partícula hipotética que tiene o bien el polo norte o bien el polo sur de un imán estándar— podría catalizar la expansión inflacionaria, evitando también las singularidades; pero tras casi cuarenta años de intensa investigación, nadie ha encontrado todavía una sola de estas partículas.[159]

Hoy por hoy, el resumen es que la puerta a la creación de nuevos universos sigue abierta, aunque muy poco. Dado que las propuestas dependen fuertemente de elementos hipotéticos, los desarrollos futuros pueden bloquear esta puerta para siempre. Pero si no lo hacen —o, quizá, si trabajo posterior permite hacer un argumento convincente a favor de la posibilidad de la creación de universos—, ¿habría motivos para proseguir? ¿Por qué crear un universo si no hay forma de verlo, ni de interaccionar con él, y ni siquiera de saber con seguridad que fue creado? Andrei Linde, famoso no sólo por sus profundas ideas cosmológicas sino también por su vena humorística, ha señalado que la atracción de jugar a Dios sencillamente resultaría irresistible.

Yo no sé si lo sería. Por supuesto, sería excitante tener un dominio tan completo de las leyes de la naturaleza que pudiéramos reconstruir los sucesos más trascendentales. Sospecho, sin embargo, que para cuando pudiéramos considerar seriamente la creación de universos —si ese momento llega alguna vez—, nuestros avances científicos y técnicos habrían puesto a nuestra disposición tantas otras empresas espectaculares, cuyos resultados no sólo podríamos imaginar sino experimentar realmente, que la naturaleza intangible de la creación de universos la habría hecho mucho menos interesante.

Seguramente el atractivo sería más fuerte si llegáramos a aprender cómo fabricar universos que pudiéramos ver o incluso interaccionar con ellos. En el caso de universos «reales», en el sentido usual de un universo constituido a partir de los ingredientes estándar de espacio, tiempo, materia y energía, todavía no tenemos ninguna estrategia para hacerlo que sea compatible con las leyes de la física tal como actualmente las entendemos.

Pero ¿qué pasa si dejamos aparte los universos reales y consideramos los virtuales?

La materia del pensamiento

Hace un par de años tuve un acceso de gripe febril acompañado de alucinaciones mucho más vívidas que cualquier sueño o pesadilla normal. Me ha quedado el recuerdo de una en la que me encontraba con un grupo de personas sentado en una habitación de un hotel casi vacío, encerrado en una alucinación dentro de la alucinación. Estaba absolutamente seguro de que pasaban días y semanas… hasta que era devuelto a la primera alucinación, en donde aprendía, para mi desconcierto, que apenas había transcurrido algún tiempo. Cada vez que me sentía arrastrado de nuevo a la habitación, me resistía con fuerza, puesto que sabía de las veces anteriores que una vez allí sería engullido, incapaz de reconocer el dominio como falso hasta que me encontrara de vuelta en la alucinación primera, en la que de nuevo quedaría desconcertado al saber que lo que yo pensaba real era ilusorio. Periódicamente, cuando la fiebre remitía, pasaba a otro nivel, de vuelta a la vida normal, y me deba cuenta de que todos estos cambios habían tenido lugar dentro de mi propia mente agitada.

Normalmente no aprendo mucho por tener fiebre. Pero esta experiencia se añadió de inmediato a algo que, hasta entonces, sólo había entendido básicamente en abstracto. Nuestra noción de la realidad es más tenue que lo que puede llevarnos a creer la vida del día a día. Modifiquemos tan sólo un poco la función normal del cerebro y el suelo de la realidad puede cambiar de repente; aunque el mundo exterior permanece estable, nuestra percepción del mismo no lo hace. Esto plantea una pregunta filosófica clásica. Puesto que todas nuestras experiencias son filtradas y analizadas por nuestros respectivos cerebros, ¿hasta que punto estamos seguros de que nuestras experiencias reflejan lo que es real? En el lenguaje que les gusta utilizar a los filósofos: ¿cómo sabe usted que está leyendo esta frase, y no flotando en un tanque en un planeta lejano, en donde científicos alienígenas estimulan su cerebro para producir los pensamientos y las experiencias que usted considera reales?

Estas preguntas son fundamentales para la epistemología, un campo filosófico que pregunta por lo que constituye el conocimiento, cómo lo adquirimos y cómo estamos seguros de que lo tenemos. La cultura popular ha llevado estas búsquedas eruditas al gran público en películas como *Matrix*, *El piso 13* y *Vanilla Sky*, jugando con ellas de maneras divertidas y que hacen pensar. Por eso, en un lenguaje más vago, la pregunta que estamos planteando es: ¿cómo sabe usted que no está conectado en la matriz?

La conclusión es que no puede saberlo con seguridad. Usted percibe el mundo a través de sus sentidos, que estimulan su cerebro de maneras para cuya interpretación ha evolucionado su sistema de circuitos neural. Si alguien estimula artificialmente su cerebro de modo que se produzcan señales eléctricas exactamente iguales a las que se producen al comer *pizza*, leer esta frase o hacer paracaidismo, la experiencia será indistinguible de

la actividad real. La experiencia está dictada por procesos cerebrales, y no por lo que activa dichos procesos.

Yendo un paso más lejos, podemos considerar que prescindimos por completo del material biológico blando. ¿Podrían ser sus pensamientos y experiencias no otra cosa que una simulación que utiliza *software* y circuitos suficientemente elaborados para imitar la función normal del cerebro? ¿Está usted convencido de la realidad de la carne, la sangre y el mundo físico, cuando su experiencia es sólo un montón de impulsos eléctricos que circulan a través de un supercomputador hiperavanzado?

Un problema inmediato al considerar tales escenarios es que fácilmente desencadenan un colapso escéptico en espiral; acabamos por no creer en nada, ni siquiera en nuestras capacidades de razonamiento deductivo. Mi respuesta inicial a preguntas como las recién planteadas es calcular cuánta potencia de computador se necesitaría para tener la posibilidad de simular un cerebro humano. Pero si yo soy parte de dicha simulación, ¿por qué debería creer algo que leo en textos de neurobiología? Los libros también serían simulaciones, escritos por biólogos simulados, cuyos hallazgos estarían dictados por el *software* que gobierna la simulación y por ello podría fácilmente ser irrelevante para el funcionamiento de los cerebros «reales». La noción misma de un cerebro «real» podría ser un artificio generado por computador. Una vez que usted no puede confiar en su conocimiento base, la realidad rápidamente se pierde.

Volveremos a estas cuestiones, pero no quiero que nos ahoguen —todavía no, al menos—. Por el momento, echemos el ancla. Imaginemos que usted es de carne y hueso, y yo también, y que todo lo que usted y yo consideramos real, en el sentido cotidiano del término, es real. Supuesto todo esto, asumamos la pregunta sobre computadores y capacidad cerebral. ¿Cuál es, aproximadamente, la velocidad de procesamiento del cerebro

humano, y cómo se compara con la capacidad de los computadores?

Incluso si no estamos atrapados en un barrizal escéptico, ésta es una pregunta difícil. La función cerebral es básicamente un territorio no cartografiado. Pero sólo para dar una idea del terreno, por confusa que sea, consideremos algunos números. La retina humana, una delgada capa de cien millones de neuronas que es más pequeña que una moneda de un céntimo y del grosor aproximado de unas pocas hojas de papel, es uno de los conjuntos de neuronas mejor estudiados. El investigador en robótica Hans Moravec ha estimado que para que un sistema retiniano basado en computador pueda igualar al de los seres humanos, necesitaría ejecutar unos mil millones de operaciones por segundo. Pasar del volumen de la retina al del cerebro entero requiere un factor de escala de aproximadamente cien mil; Moravec sugiere que simular efectivamente un cerebro requeriría un aumento comparable en capacidad de procesamiento, lo que da un total de unos cien billones (10^{14}) de operaciones por segundo.[160] Estimaciones independientes basadas en el número de sinapsis en el cerebro y en sus velocidades de descarga típicas dan velocidades de procesamiento dentro de unos pocos órdenes de magnitud de este resultado, unas 10^{17} operaciones por segundo. Aunque es difícil ser más preciso, esto da una idea de los números que entran en juego. El computador que estoy utilizando ahora tiene una velocidad de aproximadamente mil millones de operaciones por segundo; los supercomputadores más rápidos en la actualidad tienen una velocidad punta de unas 10^{15} operaciones por segundo (una estadística que sin duda pondrá fecha rápidamente a este libro). Si utilizamos la estimación más rápida para la velocidad del cerebro, encontramos que cien millones de computadores de mesa, o un centenar de supercomputadores, se acercan a la potencia de procesamiento de un cerebro humano.

Probablemente estas comparaciones son ingenuas: los misterios del cerebro son múltiples, y la velocidad es sólo una medida grosera de su funcionamiento. Pero casi todos están de acuerdo en que algún día tendremos una capacidad bruta de computación que iguale, y probablemente supere con mucho, a la que ha proporcionado la biología. Los futuristas pretenden que dicho salto tecnológico dará un mundo tan alejado de la experiencia familiar que no tenemos la capacidad de imaginar cómo será. Invocando una analogía con fenómenos que están más allá de los límites de nuestras más refinadas teorías físicas, llaman a este cuaderno de ruta visionario una singularidad. Un pronóstico a grandes rasgos sostiene que la superación de la potencia cerebral por parte de los computadores borrará por completo la frontera entre los humanos y la tecnología. Algunos prevén un mundo que marcha rampante con máquinas que piensan y sienten, mientras que aquellos de nosotros aún basados en biología a la antigua usanza transferimos rutinariamente nuestro contenido cerebral, almacenando a salvo conocimiento y personalidad *in silico*, completos con copia de seguridad, para duraciones ilimitadas.

Quizá esta visión sea exagerada. Hay poca discusión con respecto a las proyecciones sobre la potencia de computación, pero la incógnita obvia es si alguna vez utilizaremos esta potencia para conseguir una fusión radical de mente y máquina. Es una pregunta moderna con raíces antiguas; hemos estado pensando sobre el pensamiento durante miles de años. ¿Cómo es posible que el mundo externo genere nuestras respuestas internas? ¿Es su sensación de color la misma que la mía? ¿Qué pasa con sus sensaciones de sonido y tacto? ¿Qué es exactamente esa voz que oímos en nuestra cabeza, el flujo de habla interior al que llamamos nuestra mente consciente? ¿Deriva de procesos puramente físicos? ¿O la consciencia emerge de una capa de realidad que transciende lo físico? Pensadores penetrantes a lo largo

de los tiempos, Platón y Aristóteles, Hobbes y Descartes, Hume y Kant, Kierkegaard y Nietzsche, James y Freud, Wittgenstein y Turing, entre otros muchos, han tratado de iluminar (o desmitificar) los procesos que animan la mente y crean la singular vida interior que percibimos mediante introspección.

Han surgido muchas teorías de la mente, que difieren en aspectos significativos y sutiles. No necesitamos los detalles más finos, pero sólo para hacernos una idea de dónde han llegado las cosas, he aquí algunas: las teorías *dualistas*, de las que hay muchas variedades, mantienen que hay un componente esencial no física vital para la mente. Las teorías *fisicalistas* de la mente, de las que también hay muchas variedades, lo niegan, haciendo hincapié en su lugar en que cada única experiencia subjetiva es un estado cerebral único. Las teorías *funcionalistas* van más allá en esta dirección, al sugerir que lo que realmente importa para hacer una mente son los procesos y las funciones —los circuitos, sus interconexiones, sus relaciones— y no los aspectos particulares del medio físico en el que tienen lugar dichos procesos.

Los fisicalistas estarían básicamente de acuerdo en que si usted llegara a replicar fielmente mi cerebro por cualquier medio —molécula a molécula, átomo a átomo—, el producto final pensaría y sentiría realmente como yo lo hago. Los funcionalistas estarían básicamente de acuerdo en que si usted se centrara en estructuras de nivel superior —replicando todas mis conexiones cerebrales, conservando todos los procesos cerebrales y cambiando solamente el sustrato físico en el que ocurren— sería válida la misma conclusión. Los dualistas discreparían ampliamente en ambos puntos.

La posibilidad de una capacidad sensorial artificial se basa evidentemente en un punto de vista funcionalista. Una hipótesis central de esta perspectiva es que el pensamiento consciente no tiene lugar en un cerebro, sino que más bien *es* la propia

sensación generada por un tipo concreto de procesamiento de información. Que este procesamiento suceda dentro de una masa biológica de un kilo y medio o dentro de los circuitos de un computador es irrelevante. La hipótesis podría ser falsa. Quizá un haz de conexiones necesita un sustrato de materia blanda arrugada para llegar a tener autoconciencia. Quizá usted necesita las moléculas físicas reales que constituyen un cerebro, y no sólo los procesos y las conexiones que facilitan dichas moléculas, si el pensamiento consciente va a animar lo inanimado. Quizá los tipos de procesamiento de información que realizan los computadores difieran siempre en algún aspecto esencial del funcionamiento del cerebro, lo que impide el salto a la sensitividad. Quizá el pensamiento consciente sea fundamentalmente no físico, como afirmaban varias tradiciones, y por eso esté permanentemente más allá del alcance de la innovación tecnológica.

Con la aparición de tecnologías cada vez más sofisticadas, las preguntas se han hecho más concretas y el camino hacia las respuestas más tangible. Varios grupos de investigación han dado ya los pasos iniciales hacia la simulación de un cerebro biológico en un computador. Por ejemplo, el proyecto Blue Brain, una empresa conjunta entre IBM y la École Polytechnique Fédérale en Lausanne, Suiza, está dedicado a modelizar la función cerebral en el supercomputador más rápido de IBM. *Blue Gene*, como se llama el supercomputador, es una versión más potente de *Deep Blue*, el computador que triunfó en 1997 sobre el campeón del mundo de ajedrez Gary Kasparov. La aproximación de Blue Brain no es muy diferente de los escenarios que acabo de describir. Mediante laboriosos estudios anatómicos de los cerebros reales, los investigadores están reuniendo ideas cada vez más precisas sobre la estructura celular, genética y molecular de las neuronas y sus interconexiones. El proyecto pretende codificar este conocimiento, de momento básicamente al nivel

celular, en modelos digitales simulados por el computador *Blue Gene*. Hasta la fecha, los investigadores se han basado en resultados de decenas de miles de experimentos centrados en una sección del tamaño de una cabeza de alfiler de un cerebro de rata, la columna neocortical, para desarrollar una simulación por computador tridimensional de aproximadamente diez mil neuronas que se comunican a través de unos diez millones de interconexiones. Comparaciones entre la respuesta de la columna neocortical real de una rata y la simulación por computador de los mismos estímulos muestran una convincente fidelidad del modelo sintético. Esto está lejos de los cien mil millones de neuronas que se disparan en una típica cabeza humana, pero el director del proyecto, el neurocientífico Henry Markram, prevé que antes de 2020 el proyecto Blue Brain, aprovechando las velocidades de procesamiento que se prevé que aumenten en un factor de más de un millón, conseguirá un modelo simulado completo del cerebro humano. El objetivo de Blue Brain no es producir sensitividad artificial, sino más bien tener una nueva herramienta de investigación para desarrollar tratamientos para diversas formas de enfermedad mental; además, Markram ha llegado a especular que, cuando esté completo, Blue Brain puede tener muy bien la capacidad de hablar y sentir.

Independientemente del resultado, tales exploraciones son fundamentales para nuestras teorías de la mente; estoy completamente seguro de que la cuestión de cuál de las perspectivas en competición da en el blanco, si es que alguna lo hace, no pueden dirimirse mediante especulación puramente hipotética. También en la práctica son inmediatamente evidentes los problemas. Supongamos que un computador afirma un día ser sintiente: ¿cómo sabríamos si realmente lo es? Yo ni siquiera puedo verificar tales afirmaciones de sensitividad cuando las hace mi mujer. Ni ella puede hacerlas sobre mí. Eso es un lastre que surge del hecho de que la consciencia es un asunto privado. Pe-

ro puesto que nuestras interacciones humanas dan abundante evidencia circunstancial que apoya la sensitividad de los otros, el solipsismo se hace absurdo rápidamente. Las interacciones entre computadores pueden llegar algún día a un punto similar. Conversar con computadores, consolarles y engatusarles, puede un día convencernos de que la explicación más simple para su aparente autoconciencia es que realmente son autoconscientes.

Adoptemos un punto de vista funcionalista y veamos dónde lleva.

Universos simulados

Si alguna vez creamos sensitividad basada en computador, es probable que algunos implanten las máquinas pensantes en cuerpos humanos artificiales para crear una especie mecánica —robots— que estaría integrada en la realidad convencional. Pero mi interés aquí está en aquellos que estarían movidos por la pureza de impulsos eléctricos a programar entornos simulados poblados por seres simulados que existirían dentro del *hardware* de un computador; en lugar de C-3PO o Data, pensemos en Sims o Second Life, pero con habitantes que tienen mentes autoconscientes y responsables. La historia de la innovación tecnológica sugiere que, iteración tras iteración, las simulaciones ganarían verosimilitud, lo que permite que las características físicas y experienciales de los mundos artificiales alcancen niveles convincentes de matiz y realismo. Quienquiera que estuviera ejecutando una simulación dada decidiría si los seres simulados sabían que ellos existían dentro de un computador; seres humanos simulados que suponían que su mundo era un programa de computador elaborado, podrían encontrarse ma-

nejados por técnicos simulados con batas blancas. Pero probablemente la inmensa mayoría de los seres simulados consideraría que la posibilidad de que estén en una simulación por computador es demasiado estúpida como para prestarle atención.

Quizá usted está teniendo esa misma reacción precisamente ahora. Incluso si acepta la posibilidad de sensitividad artificial, puede estar convencido de que la abrumadora complejidad de simular una civilización entera, o una comunidad más pequeña, hace que estas hazañas estén más allá del alcance computacional. En este punto vale la pena considerar algunos números más. Nuestros descendientes lejanos probablemente concentrarán cantidades cada vez mayores de materia en inmensas redes de computación. De modo que dejemos vía libre a la imaginación. Pensemos a lo grande. Los científicos han estimado que un computador de alta velocidad actual del tamaño de la Tierra podría ejecutar de 10^{33} a 10^{42} operaciones por segundo. En comparación, si suponemos que nuestra estimación anterior de 10^{17} operaciones por segundo para un cerebro humano es correcta, entonces un cerebro medio realiza unas 10^{24} operaciones totales en un período de vida de cien años. Multipliquemos eso por los aproximadamente cien mil millones de personas que han pisado el planeta y el número total de operaciones realizadas por todos los cerebros humanos desde Lucy (mis amigos arqueólogos me dicen que debería decir «Ardi») es de unas 10^{35}. Utilizando la estimación conservadora de 10^{33} operaciones por segundo, vemos que la capacidad computacional colectiva de la especie humana podría conseguirse con una ejecución de menos de dos minutos en un computador del tamaño de la Tierra.

Eso es con la tecnología actual. La computación cuántica —que aprovecha todas las posibilidades distintas representadas en una onda de probabilidad cuántica para hacer muchos cálculos diferentes simultáneamente— tiene la capacidad de aumentar las velocidades de procesamiento en factores espectaculares.

Aunque estamos muy lejos todavía de dominar esta aplicación de la mecánica cuántica, los investigadores han estimado que un computador cuántico no mayor que un computador de mesa tiene la capacidad para ejecutar el equivalente a todo el pensamiento humano desde al alba de nuestra especie en una minúscula fracción de segundo.

Para simular no sólo mentes individuales, sino también sus interacciones entre ellas y con un entorno en evolución, la carga computacional crecería en órdenes de magnitud. Pero una simulación sofisticada podría recortar esquinas computacionales con un mínimo impacto sobre la calidad. Seres humanos simulados en una Tierra simulada no quedarían perjudicados si el computador sólo simulara cosas que están dentro del horizonte cósmico. Nosotros no podemos ver más allá de ese alcance, de modo que el computador puede ignorarlo sin problemas. Y lo que es más importante, la simulación podría simular estrellas más allá del Sol sólo durante noches simuladas, y aun así sólo cuando el clima local simulado diera cielos despejados. Cuando nadie está mirando, las rutinas de simulación celeste del computador podrían tomarse un descanso en la elaboración de los estímulos apropiados que dar a todas y cada una de las personas que *pudieran* mirar al cielo. Un programa suficientemente bien estructurado seguiría la pista de los estados mentales e interacciones de sus habitantes simulados, y con ello anticiparía y respondería adecuadamente a cualquier observación de estrellas prevista. Lo mismo vale para la simulación de células, moléculas y átomos. Durante la mayor parte del tiempo, sólo serían necesarias para especialistas simulados de una opinión científica u otra, y aun así sólo cuando tales especialistas estuvieran en el acto de estudiar estos dominios exóticos. Bastaría con una réplica computacionalmente más barata de la realidad familiar que ajusta el grado de detalle de la simulación a la base que se necesita.

Estos mundos simulados realizarían obligadamente la visión de Wheeler de la primacía de la información. Generemos circuitos que llevan la información correcta y habremos generado realidades paralelas que son tan reales para sus habitantes como ésta lo es para nosotros. Estas simulaciones constituyen nuestra octava variedad de multiverso, a la que llamaré el *multiverso simulado*.

¿Está usted viviendo en una simulación?

La idea de que los universos podrían ser simulados en computadores tiene una larga historia que se remonta a sugerencias hechas en los años sesenta del siglo pasado por el pionero de los computadores Konrad Zuse y el gurú digital Edward Fredkin. Yo trabajé en IBM durante los cinco veranos de mis estudios universitarios; mi jefe, el finado John Cocke, un reputado especialista en computadores, hablaba con frecuencia de la idea de Fredkin de que el universo no era otra cosa que un insaciable computador gigante que ejecutaba algo parecido a un Fortran cósmico. A mí me pareció que la idea llevaba el paradigma digital a un extremo ridículo. Durante años apenas le dedique un pensamiento… hasta que encontré, mucho más recientemente, una sencilla pero curiosa conclusión del filósofo de Oxford, Nick Bostrom.

Para apreciar la idea de Bostrom (una idea a la que también había llegado Moravec) empecemos con una sencilla comparación: la dificultad de crear un universo real *versus* la dificultad de crear un universo simulado. Crear un universo real, como hemos discutido, presenta obstáculos enormes. Y si tuviéramos éxito, el universo resultante estaría más allá de nuestra capaci-

dad de ver, lo que invita a la pregunta de qué nos motivó para crearlo antes de nada.

La creación de un universo simulado es una empresa totalmente diferente. La marcha hacia computadores cada vez más potentes, que ejecutan programas cada vez más sofisticados, es inexorable. Incluso con la rudimentaria tecnología actual, la fascinación de crear entornos simulados es fuerte; con más capacidad resulta difícil imaginar algo que despierte más interés. La cuestión no es si nuestros descendientes crearán mundos simulados por computador. Ya lo estamos haciendo. La incógnita es qué realismo llegarán a tener los mundos. Si hubiera un obstáculo inherente a la generación de sensitividad artificial, se acabarían todas las apuestas. Pero Bostrom, suponiendo que las simulaciones realistas resultan posibles, hace una simple observación.

Nuestros descendientes están abocados a crear un número inmenso de universos simulados, llenos de habitantes autoconscientes. Si alguien puede llegar a casa por la noche, relajarse y conectar el *software* crear-un-universo, es fácil imaginar que no sólo lo hará, sino que lo hará a menudo. Pensemos en lo que este escenario podría implicar. Un día futuro, un censo cósmico que tenga en cuenta todos los seres sintientes podría encontrar que el número de seres humanos de carne y hueso palidece en comparación con los hechos de chips y *bytes*, o sus equivalentes futuros. Y, razona Bostrom, si la razón de humanos simulados a humanos reales fuera colosal, entonces la estadística bruta sugiere que no estamos en un universo real. Las probabilidades favorecerían de forma aplastante la conclusión de que usted y yo y todos los demás estamos viviendo dentro de una simulación, quizá creada por historiadores futuros fascinados por cómo era la vida en la Tierra en el siglo XXI.

Usted podría objetar que ahora hemos tropezado de lleno con las arenas movedizas escépticas que pretendíamos evitar de

entrada. Una vez que concluimos que hay una alta probabilidad de que estemos viviendo en una simulación por computador, ¿cómo nos fiamos de algo, incluido el razonamiento mismo que llevaba a la conclusión? Bien, nuestra confianza en muchas cosas podría disminuir. ¿Saldrá el Sol mañana? Quizá, mientras quienquiera que esté ejecutando la simulación no tire del enchufe. ¿Son fiables todos nuestros recuerdos? Lo parecen, pero quienquiera que esté en el teclado puede tener una inclinación a ajustarlos de cuando en cuando.

Sin embargo, señala Bostrom, la conclusión de que estamos en una simulación no corta por completo nuestra aprehensión de la verdadera realidad subyacente. Incluso si creemos que estamos en una simulación, aún podemos identificar una característica que posee decididamente la realidad subyacente: permite simulaciones por computador realistas. Después de todo, según nuestra creencia, estamos en uno. El escepticismo desbocado generado por la sospecha de que somos simulados se alinea con ese mismo conocimiento y por ello no puede socavarlo. Aunque fue útil cuando empezamos a levar anclas y declarar la realidad de todo lo que parece real, no era necesario. La lógica por sí sola no puede asegurar que no estamos en una simulación por computador.

La única manera de evitar la conclusión de que probablemente estamos viviendo en una simulación es sacar partido a la debilidad intrínseca del razonamiento. Quizá la sensitividad no pueda simularse, punto final. O quizá, como Bostrom también sugiere, civilizaciones en camino hacia el dominio tecnológico necesario para crear simulaciones sintientes inevitablemente dirigirán dicha tecnología hacia dentro y se destruirán a sí mismas. O quizá cuando nuestros descendientes lejanos consigan la capacidad de crear universos simulados, ellos decidan no hacerlo, quizá por razones morales o simplemente porque otras búsquedas actualmente inconcebibles resulten tan interesantes

que, como señalamos con la creación de universos, la simulación de universos deje de interesar.

Hay muchos agujeros en el razonamiento, pero que sean suficientemente grandes para el consabido truco de escapar por ellos, ¿quién lo sabe? [161] Si no, usted podría querer echar un poco de picante en su vida, dejar su marca. Quienquiera que está ejecutando la simulación está abocado a cansarse de ser un secundario. Ser el centro de atención parecería un camino probable a la longevidad.[162]

Viendo más allá de una simulación

Si usted estuviera viviendo en una simulación, ¿podría descubrirlo? La respuesta depende en buena parte de quien está ejecutando su simulación —llamémosle el Simulador— y de la manera en que fue programada su simulación. Por ejemplo, el Simulador podría decidir dejarle en el secreto. Un día, mientras usted se está duchando, podría oír un suave «ding-dong», y al quitarse el champú de sus ojos vería una ventana flotando en la que aparecería su Simulador sonriente y se presentaría. O quizá esta revelación sucedería a escala mundial, con ventanas gigantes y una voz resonante a lo largo del planeta anunciando que hay un Programador todopoderoso en los cielos. Pero incluso si su Simulador evita el exhibicionismo, podrían aparecer pistas menos obvias.

Las simulaciones que permiten seres sintientes habrían alcanzado ciertamente un umbral mínimo de fidelidad, pero como sucede con la ropa de diseño y las imitaciones, la calidad y la consistencia probablemente variarían. Por ejemplo, una aproximación a simulaciones de programación —llamémosle la «es-

trategia emergente»— utilizaría la masa acumulada de conocimiento humano, invocando juiciosamente perspectivas relevantes dictadas por el contexto. Las colisiones entre protones en aceleradores de partículas se simularían utilizando teoría cuántica de campos. La trayectoria de una bola bateada se simularía utilizando las leyes de Newton. Las reacciones de una madre que observa los primeros pasos de sus hijos se simularían combinando ideas de la bioquímica, la fisiología y la psicología. Las acciones de los líderes gubernamentales combinarían teoría política, historia y economía. Siendo un mosaico de aproximaciones centradas en diferentes aspectos de realidad simulada, la estrategia emergente necesitaría mantener la consistencia interna a medida que procesos nominalmente construidos para darse en un dominio se extiendan a otro. Un psiquiatra no necesita un conocimiento completo de los procesos celulares, químicos, moleculares, atómicos y subatómicos que subyacen en la función cerebral —lo que es bueno para la psiquiatría—. Pero al simular una persona, el reto para la estrategia emergente sería combinar de forma consistente los niveles fino y grueso de información, de modo que se asegure, por ejemplo, que las funciones emocional y cognitiva interaccionan sensiblemente con los datos fisicoquímicos. Este tipo de engarce fronterizo tiene lugar en todos los fenómenos, y siempre ha impulsado a la ciencia a buscar explicaciones más profundas y unificadas.

Los Simuladores que utilizan estrategias emergentes tendrían que limar los desajustes que surgen de los métodos dispares, y tendrían que garantizar que el engarce fuera suave. Esto requeriría ajustes y retoques que, para un habitante, podrían presentarse como cambios súbitos y desconcertantes en el entorno sin ninguna causa o explicación aparente. Y el engarce podría dejar de ser plenamente efectivo; las inconsistencias resultantes podrían crecer con el tiempo, y hacerse quizá tan graves que el mundo se haría incoherente, y la simulación se vendría abajo.

Una forma posible de obviar tales problemas sería utilizar una aproximación diferente —llamémosle la «estrategia ultrarreduccionista»— en la que la simulación procedería por un único conjunto de ecuaciones fundamentales, como los físicos imaginan que es el caso para el universo real. Tales simulaciones tomarían como *input* una teoría matemática de la materia y las fuerzas fundamentales, y una elección de «condiciones iniciales» (cómo eran las cosas en el punto de partida de la simulación); luego el computador haría evolucionar todo hacia adelante en el tiempo, evitando con ello las cuestiones de engarce de la aproximación emergente. Pero simulaciones de este tipo encontrarían sus propios problemas computacionales, incluso más allá de la enorme carga computacional de simular «todo», hasta el comportamiento de las partículas individuales. Si las ecuaciones en posesión de nuestros descendentes son similares a las ecuaciones con las que trabajamos hoy —que incluyen números que pueden variar de forma continua—, entonces las simulaciones necesariamente utilizarían aproximaciones. Para seguir *exactamente* un número cuando varía de forma continua necesitaríamos seguir su valor con un número infinito de cifras decimales (por ejemplo, cuando una cantidad varía, digamos, de 0,9 a 1, pasaría por números como 0,9, 0,95, 0,958, 0,9583, 0,95831, 0,958317, y así sucesivamente, con un número arbitrariamente grande de dígitos requeridos para una completa exactitud). Eso es algo que no puede manejar un computador con recursos finitos: agotaría tiempo y memoria. Así pues, incluso si se utilizaran las ecuaciones más profundas, los cálculos basados en computador seguirían siendo necesariamente aproximados, y eso haría que los errores se acumularan con el tiempo.[163]

Por supuesto, por «error» entiendo una desviación entre lo que ocurre en la simulación y la descripción inherente en las teorías físicas más refinadas que el Simulador tiene a su disposición. Pero para los que como usted están dentro de la simula-

ción, las reglas matemáticas que dirigen el computador serían sus leyes de la naturaleza. La cuestión, entonces, no es con qué precisión modelan el mundo exterior las leyes matemáticas que utiliza el computador; estamos imaginando que usted no observa el mundo exterior desde dentro de la simulación. Más bien, el problema para un universo simulado es que cuando las aproximaciones necesarias de un computador contagian a las, por lo demás exactas, ecuaciones matemáticas, los cálculos pierden fácilmente su estabilidad. Los errores de redondeo, cuando se acumulan durante muchas computaciones, pueden dar inconsistencias. Usted y otros científicos simulados podrían ser testigos de anómalos resultados de experimentos; leyes preciadas podrían empezar a dar predicciones inexactas; medidas que durante mucho tiempo habían convergido en un único resultado ampliamente confirmado podrían empezar a producir respuestas diferentes. Para largos períodos de tiempo, usted y sus colegas simulados pensarían que habían encontrado pruebas, como sus ancestros lo habían hecho en siglos y milenios anteriores, de que su teoría final no era tan final después de todo. En conjunto, usted tendría que reexaminar la teoría en detalle, quizá dando con nuevas ideas, ecuaciones y principios que describan mejor los datos. Pero, suponiendo que las inexactitudes no lleven a contradicciones que destruyan el programa, en algún punto tropezará con un muro.

Tras una búsqueda exhaustiva de posibles explicaciones, ninguna de las cuales podía explicar por completo lo que estaba sucediendo, un pensador iconoclasta podría sugerir una idea radicalmente diferente. Si las leyes del continuo que los físicos habían desarrollado durante milenios fueran el *input* para un potente computador digital y se utilizaran para generar un universo simulado, los errores acumulados en las aproximaciones inherentes darían anomalías del mismo tipo que las observadas. «¿Está usted sugiriendo que estamos en una simulación por

computador?», preguntaría usted. «Sí», respondería su colega. «Bien, eso es una locura», diría usted. «¿De verdad?», respondería él. «Eche una ojeada». Y sacaría un monitor que muestra un mundo simulado que había programado utilizando las mismas leyes profundas de la física, y —conteniendo la respiración tras la conmoción de encontrar un mundo simulado— usted vería que los científicos simulados se estaban sintiendo intrigados por el mismo tipo de datos extraños que le preocupaba a usted. [164]

Un Simulador que tratara de ocultarse mejor podría utilizar, por supuesto, tácticas más agresivas. Cuando las inconsistencias empezaran a acumularse, podría reiniciar el programa y borrar las anomalías de la memoria de los habitantes. De modo que parecería exagerado afirmar que una realidad simulada revelaría su verdadera naturaleza por fallas e irregularidades. Y ciertamente me apresuraría a argumentar que inconsistencias, anomalías, preguntas sin responder y progresos estancados reflejarían algo más que nuestros fallos científicos. La interpretación razonable de esta evidencia sería que nosotros los científicos tenemos que trabajar duro y ser más creativos en la búsqueda de explicaciones. Sin embargo, una conclusión seria emerge del escenario de fantasía que he narrado. Cuando generemos mundos simulados, con habitantes aparentemente sintientes, surgirá una pregunta esencial: ¿es razonable creer que ocupamos un lugar rarificado en la historia del desarrollo científico-técnico, que nos hemos convertido en los primerísimos creadores de simulaciones sintientes? Quizá sí; pero si estamos dispuestos a seguir con las probabilidades, debemos considerar explicaciones alternativas que, en el gran esquema de las cosas, no requieren que seamos tan extraordinarios. Y hay una explicación lista para cuadrar las cosas. Una vez que nuestro propio trabajo nos convence de que las simulaciones sintientes son posibles, el principio guía del «tipo ordinario», discutido en el capítulo 7,

sugiere que no sólo hay una simulación tal ahí fuera, sino todo un océano de simulaciones, que constituyen un multiverso simulado. Aunque las simulaciones que hemos creado podrían ser un hito en el dominio limitado al que tenemos acceso, dentro del contexto del multiverso simulado entero no es nada especial, al haberse conseguido tropecientas mil veces. Una vez que aceptamos esta idea, nos vemos llevados a considerar que también podemos estar en una simulación, puesto que ése es el estatus de la inmensa mayoría de seres sintientes en un multiverso simulado.

La evidencia a favor de la sensitividad artificial y a favor de mundos simulados es una base para reconsiderar la naturaleza de su propia realidad.

La biblioteca de Babel

Durante mi primer semestre en la universidad, me matriculé en un curso introductorio de filosofía impartido por el finado Robert Nozick. Desde la primera lección, fue una carrera salvaje. Nozick estaba terminando sus voluminosas *Explicaciones filosóficas*; él utilizaba el curso como un ensayo general de muchos de los argumentos centrales del libro. Cada lección producía una sacudida, a veces violenta, en mi idea del mundo. Ésta fue una experiencia inesperada: yo había pensado que poner la realidad del revés sería una tendencia solamente en mis cursos de física. Pese a todo, había una diferencia esencial entre los dos. Las lecciones de física desafiaban las visiones cómodas exponiendo fenómenos extraños que aparecen en dominios nada familiares donde los objetos se mueven rápidamente, son extremadamente pesados o fantásticamente minúsculos. Las leccio-

nes de filosofía zarandeaban las visiones cómodas desafiando los fundamentos de la experiencia *cotidiana*. ¿Cómo sabemos que hay un mundo real ahí fuera? ¿Deberíamos fiarnos de nuestras percepciones? ¿Qué hilo enhebra nuestras moléculas y átomos para preservar nuestra identidad personal a través del tiempo?

Un día, mientras estaba haciendo tiempo después de la clase, Nozick me preguntó en qué estaba interesado, y yo le dije pomposamente que quería trabajar en gravedad cuántica y teorías unificadas. Normalmente esto ponía fin a una conversación, pero para Nozick era una ocasión para educar una mente joven revelando una nueva perspectiva. «¿Qué mueve tu interés?», me preguntó. Yo le dije que quería encontrar verdades eternas que me ayudaran a comprender por qué las cosas son como son. Ingenuo y orgulloso, por supuesto. Pero Nozick escuchó amablemente y luego llevó la idea más lejos. «Digamos que encuentras la teoría unificada», dijo. «¿Realmente eso te proporcionaría las respuestas que estás buscando? ¿No seguirías preguntándote por qué esa teoría particular, y no otra, era la teoría correcta del universo?». Él tenía razón, por supuesto, pero yo respondí que en la búsqueda de explicaciones podría llegar un momento en que tendríamos que aceptar ciertas cosas como dadas. Ahí era precisamente donde Nozick quería llevarme; al escribir *Explicaciones filosóficas* había desarrollado una alternativa a esta idea. Se basa en lo que él llamaba el principio de fecundidad y es un intento de construir explicaciones sin «aceptar ciertas cosas como dadas»; sin, como Nozick explica, aceptar algo como una verdad de fuerza bruta.

La maniobra filosófica detrás de este truco es simple: desmontar la pregunta. Si usted quiere evitar una explicación de por qué una teoría particular debería ser singularizada por encima de otra, entonces no la singularice. Nozick sugiere que imaginemos que somos parte de un multiverso que comprende *todo*

universo posible.[165] El multiverso incluiría no sólo las evoluciones alternativas que emergen del multiverso cuántico, o las muchas burbujas del multiverso inflacionario, o los posibles mundos fibrosos de los multiversos brana o paisaje. Por sí solos, estos multiversos no satisfarían la propuesta de Nozick, porque usted aún seguiría preguntándose: ¿por qué la mecánica cuántica?, o ¿por qué la inflación?, o ¿por qué la teoría de cuerdas? En su lugar, *cualquier* universo posible que imaginemos —podría estar hecho de las especies atómicas usuales, pero también serviría un universo hecho solamente de *mozzarella* fundida— tiene un lugar en el esquema de Nozick.

Éste es el último multiverso que consideraremos, puesto que es el más expansivo de todos —el más expansivo posible—. Cualquier multiverso que ha sido o será propuesto alguna vez está compuesto de universos posibles, y por consiguiente será parte de este metaconglomerado, que llamaré el *multiverso final*. Dentro de este marco, si usted pregunta por qué nuestro universo está gobernado por las leyes que revela nuestra investigación, la respuesta remite de nuevo a lo antrópico: hay otros universos ahí fuera, todos los posibles universos de hecho, y habitamos en éste porque está entre los que soportan nuestra forma de vida. En los demás universos en donde podríamos vivir —de los que hay muchos, puesto que, entre otras cosas, ciertamente podemos sobrevivir a cambios suficientemente minúsculos en los diversos parámetros fundamentales de la física— hay personas, como nosotros, que se hacen la misma pregunta. Y la misma respuesta es igualmente válida para ellas. Lo importante es que el atributo de existencia no concede al universo ningún estatus especial, porque en el multiverso final *sí* existen todos los universos posibles. La pregunta de por qué un conjunto de leyes describe un universo real —el nuestro—, mientras que todos los demás son abstracciones estériles, se evapo-

ra. No hay leyes estériles. Todos los conjuntos de leyes describen universos reales.

Curiosamente, Nozick señalaba que dentro de su multiverso habría un universo que consiste en nada. Nada absolutamente. No hay espacio vacío, sino la nada a la que Gottfried Leibniz se refería en su famosa pregunta «¿Por qué hay algo en lugar de nada?». Nozick no podía saberlo, pero para mí ésta fue una observación de particular resonancia. Cuando yo tenía diez u once años tropecé con la pregunta de Leibniz y la encontré profundamente perturbadora. Yo recorría mi habitación de una esquina a otra, intentando comprender lo que sería la nada, a veces con las manos detrás de la cabeza, pensando que la lucha por hacer lo imposible —ver mi mano— me ayudaría a captar el significado de la ausencia total. Incluso ahora, centrarme en una nada absolutamente verdadera me produce desasosiego. La nada total, desde nuestro familiar punto de vista del algo, supone la pérdida más profunda. Pero puesto que la nada también parece enormemente más simple que algo —no hay leyes en acción, no hay materia en juego, no hay espacio que habitar, no hay tiempo que desplegar—, la pregunta de Leibniz parece dar en el blanco. *¿Por qué no existe la nada*? La nada hubiera sido decididamente elegante.

En el multiverso final, un universo que consiste de nada sí existe. Por lo que podemos decir, la nada es una posibilidad perfectamente lógica y por eso debe ser incluida en un multiverso que abarca todos los universos. La respuesta de Nozick a Leibniz es que en el multiverso final no hay un desequilibrio entre algo y nada que pida una explicación. Universos de ambos tipos son parte de este multiverso. Un universo nada no es nada por donde pasearse. Si el universo nada nos elude es solamente porque los seres humanos somos algo.

Un teórico, formado para hablar de matemáticas, entiende el multiverso omniabarcador de Nozick como un multiverso en

donde se realizan físicamente todas las posibles ecuaciones matemáticas. Es una versión del relato «La biblioteca de Babel», de Jorge Luis Borges, en la que los libros de Babel están escritos en el lenguaje de las matemáticas, y por eso contienen todas las posibles cadenas de símbolos matemáticos razonables y no contradictorias.[166] Algunos de los libros contendrían las fórmulas familiares, tales como las ecuaciones de la relatividad general y las de la mecánica cuántica, aplicadas a las partículas de la naturaleza conocidas. Pero esas cadenas reconocibles de caracteres matemáticos serían extremadamente raras. La mayoría de los libros contendría ecuaciones que nadie había escrito con anterioridad, ecuaciones que normalmente se juzgarían como puras abstracciones. La idea del multiverso final es desprenderse de esta perspectiva familiar. Ya no está latente la mayoría de las ecuaciones, con sólo unas pocas afortunadas misteriosamente animadas de vida mediante realización física. En su lugar, todo libro en la biblioteca de Babel matemática es un universo real.

La sugerencia de Nozick, en su forma matemática, proporciona una respuesta concreta a una cuestión largo tiempo debatida. Durante siglos, matemáticos y filósofos se han preguntado si las matemáticas se descubren o se inventan. ¿Están los conceptos y las verdades matemáticas «ahí fuera», esperando que un intrépido explorador tropiece con ellos? ¿O, puesto que es más que probable que el explorador esté sentado ante una mesa, lápiz en mano, garabateando furiosamente símbolos arcanos en una página, son inventados los conceptos y las verdades matemáticas resultantes como parte de la búsqueda de orden y estructura por parte de la mente?

A primera vista, la misteriosa manera en que muchas ideas matemáticas encuentran aplicación a problemas físicos proporciona evidencia convincente de que las matemáticas son reales. Hay abundantes ejemplos. De la relatividad general a la mecáni-

ca cuántica, los físicos han encontrado que diversos descubrimientos matemáticos están hechos a medida para aplicaciones físicas. La predicción que hizo Paul Dirac del positrón (la antipartícula del electrón) ofrece un ejemplo simple pero impresionante. En 1931, al resolver sus ecuaciones cuánticas para el movimiento de los electrones, Dirac encontró que las matemáticas ofrecían una solución «extraña» que describía aparentemente el movimiento de una partícula exactamente igual que el electrón, salvo que llevaba carga eléctrica positiva (mientras que la carga del electrón es negativa). En 1932, esa misma partícula fue descubierta por Carl Anderson gracias a un estudio detallado de los rayos cósmicos que bombardean la Tierra desde el espacio. Lo que empezó como una manipulación de símbolos matemáticos por parte de Dirac en sus cuadernos concluyó en el laboratorio con el descubrimiento experimental de la primera especie de antimateria.

No obstante, el escéptico puede contraatacar diciendo que las matemáticas emanan de nosotros. La evolución nos ha conformado para encontrar pautas en el entorno; cuanto mejor pudiéramos hacerlo, mejor podríamos predecir cómo encontrar la próxima comida. Las matemáticas, el lenguaje de las pautas, surgieron de nuestra adaptación biológica. Y con ese lenguaje hemos sido capaces de sistematizar la búsqueda de nuevas pautas, que van mucho más allá de las relevantes para la mera supervivencia. Pero las matemáticas, como cualquiera de las herramientas que desarrollamos y utilizamos a través de los tiempos, son una invención humana.

Mi visión de las matemáticas cambia periódicamente. Cuando yo estoy en medio de una investigación matemática que está saliendo bien, suelo tener la sensación de que es un proceso de descubrimiento y no de invención. No conozco ninguna experiencia más excitante que observar que las piezas dispares de un rompecabezas matemático encajan repentinamente en una úni-

ca imagen coherente. Cuando esto ocurre, hay una sensación de que la imagen estaba allí todo el tiempo, como una gran vista oculta por la niebla de la mañana. Por el contrario, cuando examino las matemáticas de forma más objetiva, estoy menos convencido. El conocimiento matemático es el producto literario de seres humanos que conversan en el lenguaje inusualmente preciso de las matemáticas. Y como sucede ciertamente con la literatura producida en cualquiera de los lenguajes naturales del mundo, la literatura matemática es el producto del ingenio y la creatividad humanos. Esto no quiere decir que otras formas de vida inteligente no pudieran dar con los mismos resultados matemáticos que nosotros hemos encontrado; muy bien podrían hacerlo. Pero eso podría reflejar similitudes en nuestras experiencias (tales como la necesidad de contar, la necesidad de comerciar, la necesidad de cartografiar, y así sucesivamente), y por ello proporcionarían mínima evidencia de que las matemáticas tienen una existencia trascendente.

Hace algunos años, en un debate público sobre el tema, dije que podría imaginar un encuentro con alienígenas durante el cual, en respuesta a conocer nuestras teorías científicas, ellos comentarían: «¡Oh!, matemáticas. Sí, las ensayamos durante un tiempo. Al principio parecían prometedoras, pero finalmente eran un callejón sin salida. Os vamos a mostrar cómo funcionan realmente». Pero, para continuar con mi propia vacilación, no sé cómo los alienígenas terminarían realmente la frase, y con una definición suficientemente amplia de las matemáticas (como por ejemplo deducciones lógicas que se siguen de un conjunto de hipótesis), ni siquiera estoy seguro de qué tipo de respuestas no equivaldría a matemáticas.

El multiverso final es inequívoco sobre esta cuestión. Todas las matemáticas son reales en el sentido de que todas las matemáticas describen algún universo real. A lo largo del multiverso, todas las matemáticas tienen su función. Un universo go-

bernado por las ecuaciones de Newton y poblado solamente por bolas de billar duras (sin ninguna estructura interna) es un universo real; un universo vacío con 666 dimensiones espaciales gobernado por una versión en dimensiones más altas de las ecuaciones de Newton es también un universo. Si los alienígenas tuvieran razón, también habría universos cuya descripción quedaría fuera de las matemáticas. Pero dejemos de lado esta posibilidad. Un universo que realice todas las ecuaciones matemáticas será suficiente para mantenernos ocupados; eso es lo que nos da el multiverso final.

Racionalización del multiverso

En lo que el multiverso final difiere de las otras propuestas de universos paralelos que hemos encontrado es en el razonamiento que lleva a su consideración. Las teorías del multiverso en capítulos anteriores no estaban pensadas para resolver un problema o responder a una pregunta. Algunas de ellas lo hacen, o al menos lo pretenden, pero no fueron elaboradas con ese objetivo. Hemos visto que algunos teóricos creen que el multiverso cuántico resuelve el problema de la medida cuántica; otros creen que el multiverso cíclico aborda la cuestión del principio del tiempo; otros creen que el multiverso brana aclara por qué la gravedad es mucho más débil que las otras fuerzas; otros creen que el multiverso paisaje da ideas sobre el valor observado de la energía oscura; otros creen que el multiverso holográfico explica los datos que salen de la colisión entre núcleos atómicos pesados. Pero tales aplicaciones son secundarias. La mecánica cuántica fue desarrollada para describir el microdominio; la cosmología inflacionaria fue desarrollada para dar

sentido a las propiedades observadas del cosmos; la teoría de cuerdas fue desarrollada para mediar entre mecánica cuántica y relatividad general. La posibilidad de que estas teorías generen varios multiversos es un producto colateral.

El multiverso final, por el contrario, no tiene peso explicatorio, aparte de su hipótesis de un multiverso. Alcanza precisamente un objetivo: eliminar de nuestra lista de cosas por hacer el proyecto de encontrar una explicación de por qué nuestro universo se adhiere a un conjunto de leyes matemáticas y no a otro, y logra precisamente esta hazaña singular introduciendo un multiverso. Cocinado específicamente para abordar una cuestión, el multiverso final carece de la lógica independiente que caracteriza a los multiversos discutidos en capítulos anteriores.

Ésta es mi opinión, pero no todos están de acuerdo. Hay una perspectiva filosófica (que procede de la escuela de pensamiento del *realismo estructural*) que sugiere que los físicos pueden haber sido presa de una falsa dicotomía entre matemáticas y física. Es habitual que los físicos teóricos hablen de que las matemáticas ofrecen un lenguaje cuantitativo para describir la realidad física; yo lo he hecho en casi todas las páginas de este libro. Pero esta perspectiva sugiere que quizá las matemáticas son algo más que tan sólo una descripción de la realidad. Quizá las matemáticas *son* la realidad.

Es una idea peculiar. No estamos acostumbrados a pensar que la sólida realidad está construida a partir de matemáticas intangibles. Los universos simulados de la sección precedente proporcionan una manera concreta e iluminadora de pensarlo. Consideremos la más famosa de las reacciones reflejas, aquella con la que Samuel Johnson respondió a la afirmación del obispo Berkeley de que la materia es una ficción de la mente dando una patada a una gran piedra. Imaginemos, sin embargo, que desconocida para el Dr. Johnson, su patada ocurría dentro de

una simulación por computador hipotética y de alta fidelidad. En ese mundo simulado, la experiencia de la piedra del Dr. Johnson sería tan convincente como lo es en la versión histórica. Pese a todo, la simulación por computador no es nada más que una cadena de manipulaciones matemáticas que toma el estado del computador en un instante —una disposición compleja de bits— y, de acuerdo con reglas matemáticas especificadas, hace evolucionar dichos bits a través de disposiciones subsiguientes.

Lo que significa que si usted fuera a estudiar intencionadamente las transformaciones matemáticas que hizo el computador durante la demostración del Dr. Johnson, vería, precisamente en las matemáticas, la patada y el rebote de su pie, así como el pensamiento y la famosa expresión «lo refuto así». Conecte el computador a un monitor (o alguna *interface* futurista) y vería que la danza de bits con coreografía matemática genera al Dr. Jonson y su patada. Pero no dejemos que los adornos de la simulación —el *hardware* del computador, la *interface* de fantasía y demás— oscurezcan el hecho esencial: por debajo de la capucha, no hay otra cosa que matemáticas. Cambie las reglas matemáticas, y los bits danzantes darán una realidad diferente.

Ahora bien, ¿por qué detenerse ahí? Yo puse al Dr. Johnson en una simulación sólo porque ese contexto ofrece un puente instructivo entre las matemáticas y la realidad del Dr. Johnson. Pero el punto más profundo de esta perspectiva es que la simulación por computador es un paso intermedio no esencial, un mero punto de apoyo mental entre la experiencia de un mundo tangible y la abstracción de las ecuaciones matemáticas. Las propias matemáticas —mediante las relaciones que crean, las conexiones que establecen, y las transformaciones que encarnan— contienen al Dr. Johnson, sus acciones y sus ideas. Usted no necesita el computador. Usted no necesita los bits danzantes. *El Dr. Johnson está en las matemáticas*.[167]

Y una vez que usted asume la idea de que las propias matemáticas, a través de su estructura inherente, pueden incorporar cualquiera y todos los aspectos de la realidad —mentes sintientes, rocas pesadas, fuertes patadas, dedos de los pies machacados—, usted se ve llevado a concebir que nuestra realidad no es otra cosa que matemáticas. En esta manera de pensar, todo de lo que usted es consciente —la sensación de sostener este libro, los pensamientos que está teniendo ahora, los planes que esta haciendo para cenar— es la experiencia de las matemáticas. La realidad es cómo sienten las matemáticas.

Por supuesto, esta perspectiva requiere un salto conceptual que no todos estarán dispuestos a dar; personalmente, es un salto que yo no he dado. Pero para quienes lo hacen, esta visión del mundo ve las matemáticas como algo que no sólo está «ahí fuera», sino como lo único que hay «ahí fuera». Un corpus de matemáticas, sean las ecuaciones de Newton, las de Einstein, o cualesquiera otras, no se hace real cuando aparecen entidades físicas que las ejemplifican. Las matemáticas —todas las matemáticas— son ya reales; no requieren ejemplificación. Diferentes colecciones de ecuaciones matemáticas son universos diferentes. El multiverso final es así el producto colateral de esta perspectiva sobre las matemáticas.

Max Tegmark, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que ha sido un fuerte promotor del multiverso final (al que él ha llamado la hipótesis del universo matemático), justifica esta visión mediante una consideración relacionada. La descripción más profunda del universo no debería requerir conceptos cuyo significado se basa en la experiencia o la interpretación de los seres humanos. La realidad trasciende a nuestra existencia y por ello no debería depender, de ninguna manera fundamental, de ideas de nuestra cosecha. La visión de Tegmark es que las matemáticas —pensadas como una colección de operaciones (tales como la suma) que actúan sobre conjuntos abstractos de

objetos (tales como los números enteros), dando varias relaciones entre ellos (tales como 1 + 2 = 3)— son precisamente el lenguaje para expresar enunciados que evitan el contagio humano. Pero entonces, ¿qué podría distinguir un corpus de matemáticas del universo que representa? Tegmark argumenta que la respuesta es nada. Si hubiera alguna característica que distingue entre las matemáticas y el universo, tendría que ser no matemática; de lo contrario, podría ser absorbida en la representación matemática, con lo que se borraría la supuesta distinción. Pero, según esta línea de pensamiento, si la característica no fuera matemática, debe guardar una huella humana, y por ello no puede ser fundamental. Así pues, no hay nada que distinga lo que convencionalmente llamamos descripción matemática de la realidad de su realización física. Son lo mismo. No hay ningún interruptor que «encienda» las matemáticas. Existencia matemática es sinónimo de existencia física. Y puesto que esto sería verdad para cualesquiera y todas las matemáticas, esto proporciona otra ruta que nos lleva al multiverso final.

Aunque vale la pena contemplar todos estos argumentos, yo sigo siendo escéptico. Al evaluar una propuesta de multiverso dada, yo prefiero que haya un proceso, por provisional que sea —un campo inflatón fluctuante, colisiones entre mundobranas, efecto túnel cuántico a través del paisaje de la teoría de cuerdas, una onda que evoluciona vía la ecuación de Schrödinger—, que podemos imaginar que genera el universo. Prefiero basar mi pensamiento en una secuencia de sucesos que, al menos en principio, pueden dar como resultado el despliegue del universo dado. En el caso del multiverso final es difícil imaginar cuál podría ser tal proceso; el proceso tendría que dar leyes matemáticas diferentes en dominios diferentes. En los multiversos inflacionario y paisaje hemos visto que los detalles de cómo se manifiestan las leyes de la física pueden variar de un universo a otro, pero esto se debe a diferencias ambientales, tales como

los valores de ciertos campos de Higgs o la forma de las dimensiones extra. Las ecuaciones matemáticas subyacentes, que operan a lo largo del universo, son las mismas. Así pues, ¿qué proceso, que opera dentro de un conjunto dado de leyes matemáticas, puede cambiar dichas leyes matemáticas? Como el número cinco tratando desesperadamente de ser seis, esto parece lisa y llanamente imposible.

Sin embargo, antes de decidirnos por esa conclusión, consideremos esto: puede haber dominios que se *presentan* como si estuvieran gobernados por reglas matemáticas diferentes. Pensemos de nuevo en los mundos simulados. Al discutir antes al Dr. Johnson, invoqué una simulación por computador como un artificio pedagógico para explicar cómo las matemáticas pueden encarnar la esencia de la experiencia. Pero si consideramos tales simulaciones en sí mismas, como hacemos en el multiverso simulado, vemos que ofrecen precisamente el proceso que necesitamos: aunque el *hardware* informático en el que se ejecuta la simulación está sujeto a las leyes usuales de la física, el propio mundo simulado estará basado en las ecuaciones matemáticas que el usuario decida escoger. De una simulación a otra, las leyes matemáticas pueden variar, y generalmente lo harán.

Como veremos ahora, esto proporciona un mecanismo para generar una particular parte privilegiada del multiverso final.

Simulando Babel

Antes señalé que para los tipos de ecuaciones que normalmente estudiamos en física, las simulaciones por computador dan solamente aproximaciones a las matemáticas. Éste es gene-

ralmente el caso cuando se trabaja con números continuos en un computador digital. Por ejemplo, en física clásica (suponiendo, como hacemos en física clásica, que el espacio-tiempo es continuo) una bola bateada pasa por un número infinito de puntos diferentes cuando viaja desde la posición de bateo hasta el campo.[168] Seguir la trayectoria de una bola a través de infinitos lugares, y de una infinidad de velocidades posibles en tales lugares, siempre seguirá estando fuera de alcance. Como mucho, los computadores pueden realizar cálculos muy refinados pero siempre aproximados, siguiendo a una bola cada millonésima o milmillonésima o billonésima de centímetro, por ejemplo. Esto está bien para muchos fines, pero sigue siendo una aproximación. La mecánica cuántica y la teoría cuántica de campos, al introducir varias formas de discretización, ayudan de alguna manera. Pero ambas hacen un extenso uso de números que varían de forma continua (valores de ondas de probabilidad, valores de campos y demás). El mismo razonamiento vale para todas las otras ecuaciones estándar de la física. Un computador puede aproximar las matemáticas, pero no puede simular exactamente las ecuaciones.[169]

No obstante, hay otros tipos de funciones matemáticas para las que una simulación por computador puede ser absolutamente precisa. Forman parte de una clase llamada *funciones computables*, que son funciones que pueden ser evaluadas por un computador que ejecuta un conjunto finito de instrucciones discretas. El computador quizá necesite recorrer repetidamente la colección de pasos, pero más pronto o más tarde dará la respuesta exacta. No se necesita ninguna originalidad ni novedad en ningún paso; es simplemente cuestión de esperar pacientemente el resultado. Así pues, en la práctica, para simular el movimiento de una bola bateada los computadores se programan con ecuaciones que son *aproximaciones computables* a las leyes de la física que usted aprendió en el instituto. (Normalmente, el

espacio y el tiempo continuos se aproximan en un computador por una malla fina).

Por el contrario, un computador que trata de calcular una función no computable seguirá zumbando indefinidamente sin llegar a una respuesta, sea cual sea su velocidad o su capacidad de memoria. Tal sería el caso para un computador que busque la trayectoria continua exacta de la bola bateada. Como ejemplo más cualitativo, imaginemos un universo simulado en el que un computador está programado para ofrecer un chef de cocina simulado con maravillosa eficiencia que proporciona comidas para todos aquellos habitantes simulados —y sólo aquellos habitantes simulados— que no cocinan para sí mismos. Cuando el chef cuece, fríe y hierve frenéticamente le entra apetito. La pregunta es: ¿a quién encargará el computador de alimentar al chef?[170] Piense en ello y sólo conseguirá tener dolor de cabeza. El chef no puede cocinar para sí mismo, pues él sólo cocina para aquellos que no cocinan para sí mismos; pero si el chef no cocina para sí mismo, él está entre aquellos para los que se suponía que cocina. Aunque con reposo asegurado, la cabeza del computador apenas lo haría mejor que la de usted. Las funciones no computables se parecen mucho a este ejemplo: anulan la capacidad de un computador para completar sus cálculos, y por ello la simulación que ejecuta el computador se colgará. Por consiguiente, los universos exitosos que constituyen el multiverso simulado estarían basados en funciones computables.

La discusión sugiere un solapamiento entre los multiversos simulado y final. Consideremos una versión a escala reducida del multiverso final que solo incluye universos que salen de funciones computables. Entonces, más que ser meramente introducido como una solución a una pregunta concreta —¿por qué este universo es real, mientras que otros universos posibles no lo son?—, la versión a escala reducida del multiverso final puede salir de un proceso. Un ejército de futuros usuarios de

computadores, quizá no muy diferentes en carácter de los entusiastas actuales de Second Life, podría llenar este multiverso con su insaciable fascinación por ejecutar simulaciones basadas en ecuaciones siempre diferentes. Estos usuarios no generarían todos los universos contenidos en la biblioteca matemática de Babel, porque los basados en funciones no computables no conseguirían despegar. Pero los usuarios harían continuamente su camino a través del ala computable de la biblioteca.

El científico de la computación Jürgen Schmidhuber, ampliando ideas anteriores de Zuse, ha llegado a una conclusión similar desde un ángulo diferente. Schmidhuber se dio cuenta de que en realidad es más fácil programar un computador para generar todos los posibles universos computables que programar computadores individuales para generarlos uno a uno. Para ver por qué, imaginemos que se programa un computador para simular partidos de béisbol. Por cada partido, la cantidad de información que hay que suministrar es inmensa: cada detalle sobre cada jugador, físico y mental, cada detalle sobre el estadio, el clima y todo lo demás. Y a cada nuevo partido, su simulación requiere especificar otra montaña de datos. Sin embargo, si usted decide simular no uno o unos pocos partidos, sino todo partido imaginable, su trabajo de programación sería mucho más fácil. Sólo tendría que fijar un programa maestro que sistemáticamente barra cada variable posible —las que afectan a los jugadores, el entorno y todos los demás aspectos relevantes— y dejar que el programa corra. Encontrar cualquier partido concreto en el voluminoso producto resultante sería un reto, pero usted estaría seguro de que más pronto o más tarde aparecería todo juego posible.

El punto importante es que mientras que especificar un miembro de una gran colección requiere mucha información, especificar la colección entera puede ser a menudo mucho más fácil. Schmidhuber encontró que esta conclusión se aplica a

universos simulados. Un programador contratado para simular una colección de universos basados en conjuntos específicos de ecuaciones matemáticas podría tomar la salida fácil: igual que el entusiasta del béisbol, podría optar por escribir un programa único y relativamente corto que generara todos los universos compatibles y dejar libre al computador. En algún lugar entre la gigantesca colección resultante de universos simulados, el programador encontraría aquellos para cuya simulación había sido contratado. Yo no querría estar pagando por un uso de computador durante el tiempo gigantesco que sería necesario para estas simulaciones. Pero pagaría con gusto al programador, puesto que las instrucciones fijadas para generar todos los universos computables serían mucho menos extensas que las necesarias para dar un universo en particular.[171]

Uno u otro de estos escenarios —muchos usuarios simulando muchos universos, o un programa maestro que los simula a todos— es una manera de generar el multiverso simulado. Y puesto que los universos resultantes estarían basados en una amplia variedad de leyes matemáticas diferentes, podemos pensar de forma equivalente que estos escenarios generan parte del multiverso final: la parte que abarca universos basados en funciones matemáticas computables.[172]

La pega de generar sólo una parte del multiverso final es que esta versión reducida aborda de forma menos eficaz la cuestión que inspiraba originalmente el principio de fecundidad de Nozick. Si no existen todos los universos posibles, si no se genera el mutiverso final entero, vuelve a salir a la superficie la pregunta de por qué algunas ecuaciones llegan a tener vida y otras no. En concreto, nos quedamos preguntándonos por qué los universos basados en ecuaciones computables acaparan toda la atención.

Para seguir en el camino altamente especulativo de este capítulo, quizá la división computable/no computable nos esté di-

ciendo algo. Las ecuaciones matemáticas computables evitan las cuestiones espinosas planteadas a mitad del siglo pasado por pensadores penetrantes como Kurt Gödel, Alan Turing y Alonzo Church. El famoso *teorema de incompletitud* de Gödel muestra que ciertos sistemas matemáticos necesariamente admiten enunciados verdaderos que no pueden ser demostrados dentro del propio sistema matemático. Los físicos se han preguntado durante mucho tiempo sobre las posibles implicaciones de las ideas de Gödel para su propio trabajo. ¿Podría la física, también, ser necesariamente incompleta, en el sentido de que algunos aspectos del mundo natural eludirían para siempre nuestras descripciones matemáticas? En el contexto del multiverso final a escala reducida, la respuesta es no. Las funciones matemáticas computables, por definición, caben perfectamente dentro de los límites del cálculo. Precisamente son las funciones que admiten un procedimiento por el cual un computador puede evaluarlas con éxito. Y así, si todos los universos en un multiverso estuvieran basados en funciones computables, todos eludirían también el teorema de Gödel; esta ala de la biblioteca matemática de Babel, esta versión del multiverso final, estaría libre del fantasma de Gödel. Quizá eso es lo que discrimina a las funciones computables.

¿Encontraría *nuestro* universo un lugar en este multiverso? Es decir: cuando tengamos, si las llegamos a tener, las leyes finales de la física, ¿describirán estas leyes el cosmos utilizando funciones matemáticas que son computables? No funciones aproximadamente computables; eso ya sucede con las leyes físicas con las que trabajamos hoy. Pero ¿exactamente computables? Nadie lo sabe. Si es así, los desarrollos en física deberían llevarnos hacia teorías en las que el continuo no desempeña ningún papel. La discretización, el núcleo del paradigma computacional, debería prevalecer. Por supuesto, el espacio parece continuo, pero sólo lo hemos sondeado hasta una trillonésima de un

metro. Es posible que con sondas más refinadas establezcamos algún día que el espacio es fundamentalmente discreto; por ahora, la cuestión está abierta. Un conocimiento limitado se aplica también a los intervalos de tiempo. Los descubrimientos narrados en el capítulo 9, que dan una capacidad de información de un bit por área de Planck en cualquier región del espacio, constituyen un paso importante en la dirección de la discretización. Pero la cuestión de hasta dónde puede llevarse el paradigma digital sigue estando lejos de quedar zanjada.[173] Mi conjetura es que, ya lleguen a hacerse o no alguna vez simulaciones sintientes, encontraremos que el mundo es fundamentalmente discreto.

Las raíces de la realidad

En el multiverso simulado no hay ambigüedad con respecto a qué universo es «real» —es decir, qué universo yace en la raíz del árbol ramificado de mundos simulados—. Es el universo que alberga esos computadores que, si se rompieran, acabarían con el multiverso entero. Un habitante simulado podría simular su propio conjunto de universos en computadores simulados, como podrían hacerlo los habitantes de dichas simulaciones, pero sigue habiendo computadores reales en los que todas estas simulaciones por capas aparecen como una avalancha de impulsos eléctricos. No hay ninguna incertidumbre sobre qué hechos, estructuras y leyes son reales en el sentido tradicional: son los que trabajan en el universo raíz.

Sin embargo, los científicos simulados típicos a lo largo del multiverso simulado pueden tener una perspectiva diferente. Si se les da a estos científicos una autonomía suficiente —si los si-

mulantes rara vez retocan los recuerdos de los habitantes o interrumpen el flujo natural de sucesos—, entonces, a juzgar por nuestras propias experiencias, podemos anticipar que ellos harán grandes progresos al descubrir el código matemático que mueve su mundo. Y ellos considerarán dicho código como sus leyes de la naturaleza. Sin embargo, sus leyes no son necesariamente idénticas a las leyes que gobiernan el universo real. Sus leyes simplemente tienen que ser suficientemente buenas, en el sentido de que cuando son simuladas en un computador dan un universo con habitantes sintientes. Si hay muchos conjuntos distintos de leyes matemáticas con una calidad suficientemente buena, podría haber también una población cada vez mayor de científicos simulados convencidos de leyes matemáticas que, lejos de ser fundamentales, habrían sido simplemente escogidas por quienquiera que haya programado su simulación. Si nosotros somos habitantes típicos en tal multiverso, este razonamiento sugiere que lo que normalmente consideramos como ciencia, una disciplina encargada de revelar verdades fundamentales sobre la realidad —la realidad raíz que opera en la base del árbol— estaría socavada.

Es una posibilidad incómoda, pero no una que me quite el sueño. Hasta que tenga que contener la respiración por ver una simulación sintiente, no considero seriamente la proposición de que yo estoy ahora en una. Y, adoptando esta visión a largo plazo, incluso si algún día se consiguen simulaciones sintientes —que es un gran sí—, puedo imaginar perfectamente que cuando las capacidades técnicas de una civilización posibiliten por primera vez tales simulaciones, su atractivo sería tremendo. Pero ¿duraría mucho ese atractivo? Sospecho que la novedad de crear mundos artificiales cuyos habitantes no sean conscientes de su estatus simulado se acabaría pronto; es como la realidad que uno puede ver en la televisión.

En su lugar, si dejo que mi imaginación vuele libremente dentro de este territorio especulativo, mi sensación es que el mayor empeño estaría en las aplicaciones que desarrollaran interacciones entre los mundos simulado y real. Quizá los habitantes simulados serían capaces de migrar al mundo real o unirse en el mundo simulado con sus reales contrapartidas biológicas. Con el tiempo, la distinción entre seres reales y simulados podría hacerse anacrónica. Tales uniones sin costuras me parecen un resultado más probable. En ese caso, el multiverso simulado contribuiría a la extensión de la realidad —nuestra extensión de la realidad, nuestra realidad real— de la forma más tangible. Se convertiría en una parte intrínseca de lo que entendemos por «realidad».

11

Los límites de la indagación

Los multiversos y el futuro

Isaac Newton abrió una enorme grieta en la empresa científica. Descubrió que unas pocas ecuaciones matemáticas podían describir cómo se mueven las cosas, tanto aquí en la Tierra como en el espacio. Considerando la fuerza y la simplicidad de sus resultados, hubiera sido fácil imaginar que las ecuaciones de Newton reflejaban verdades eternas grabadas en la piedra del cosmos. Pero el propio Newton no pensaba así. Creía que el universo era mucho más rico y misterioso que lo que sus leyes implicaban; es conocida la reflexión que hizo en sus años finales: «No sé lo que puedo parecer al mundo, pero yo me veo como un niño jugando en la orilla del mar, que se divierte encontrando de cuando en cuando un guijarro más liso o una concha más bonita de lo normal, mientras el gran océano de la verdad se extiende inexplorado ante mí». Los siglos transcurridos desde entonces no han hecho sino ratificarlo.

Yo me alegro. Si las ecuaciones de Newton gozaran de un alcance ilimitado, si describieran exactamente fenómenos en cualquier contexto, sea grande o pequeño, pesado o ligero, rápido o lento, la odisea científica posterior habría tomado un carácter muy diferente. Las ecuaciones de Newton nos enseñan mucho sobre el mundo, pero su validez ilimitada habría significado que el cosmos tenía el mismo sabor en todas partes. Una vez que se entendiera la física en las escalas cotidianas, ya esta-

ría hecho todo. La misma historia sería válida desde lo más grande hasta lo más pequeño.

Al continuar las exploraciones de Newton, los científicos se han aventurado en dominios que están mucho más allá del alcance de sus ecuaciones. Lo que hemos aprendido ha requerido cambios profundos en nuestra comprensión de la naturaleza de la realidad. Tales cambios no se han hecho a la ligera. Han sido examinados en detalle por la comunidad científica, y a menudo han ofrecido clara resistencia; la nueva visión sólo se abraza cuando las pruebas alcanzan una abundancia crítica. Que es precisamente como debería ser. No hay necesidad de precipitar el juicio. La realidad esperará.

El hecho central, más fuertemente acentuado por los cien últimos años de avances teóricos y experimentales, es que la experiencia común deja de ser una buena guía para excursiones que van más allá de las circunstancias cotidianas. Pero pese a la física radicalmente nueva que se encontró en condiciones extremas —descrita por la relatividad general, la mecánica cuántica y, si se probara correcta, la teoría de cuerdas—, el hecho de que se requirieran ideas radicalmente nuevas no es sorprendente. La hipótesis básica de la ciencia es que regularidades y pautas existen en todas las escalas, pero, como anticipó el propio Newton, no hay razón para esperar que las pautas que realmente encontramos se repitan en todas las escalas.

La sorpresa hubiera sido no encontrar sorpresas.

Lo mismo es indudablemente cierto con respecto a lo que revelará la física en el futuro. Una generación de científicos dada nunca puede saber si la historia juzgará su trabajo como una diversión, como una fascinación pasajera, como un peldaño más o como algo que ha revelado ideas que resistirán la prueba del tiempo. Esta incertidumbre local está compensada por uno de los aspectos más gratificantes de la física, la estabilidad glo-

bal; es decir, las nuevas teorías no borran, en general, las teorías a las que sustituyen. Como hemos discutido, aunque las nuevas teorías pueden necesitar una aclimatación a nuevas perspectivas sobre la naturaleza de la realidad, casi nunca hacen irrelevantes los descubrimientos pasados. Más bien, los incorporan y amplían. Debido a esto, la historia de la física ha mantenido una coherencia impresionante.

En este libro hemos explorado un candidato para el próximo desarrollo importante en esta historia: la posibilidad de que nuestro universo sea parte de un multiverso. El viaje nos ha llevado a través de nueve variaciones sobre el tema del multiverso, que se resumen en la Tabla 11.1. Aunque las diversas propuestas difieren ampliamente en los detalles, todas sugieren que nuestra imagen de sentido común de la realidad es sólo parte de un todo mayor. Y todas llevan la marca indeleble del ingenio y la creatividad humana. Pero determinar si alguna de estas ideas va más allá de elucubraciones matemáticas de la mente humana requerirá más intuición, conocimiento, cálculo, experimento y observación que lo que hemos conseguido hasta ahora. Un juicio definitivo sobre si los universos paralelos se escribirán en el próximo capítulo de la historia de la física también debe esperar la perspectiva que sólo el futuro puede brindar.

TABLA 11.1 Resumen de las diversas versiones de universos paralelos.

Propuesta de universo paralelo	**Descripción**
Multiverso	Las condiciones en un universo infinito se repiten necesariamente a lo largo del espacio, lo que da mundos

mosaico	paralelos.
Multiverso inflacionario	La inflación cosmológica eterna da una enorme red de universos burbuja, de los que nuestro universo sería uno.
Multiverso brana	En el escenario mundobrana de la teoría-M/de cuerdas, nuestro universo existe en una brana tridimensional que flota en una extensión de dimensiones más altas potencialmente poblada por otras branas, otros universos paralelos.
Multiverso cíclico	Las colisiones entre mundobranas pueden manifestarse como comienzos tipo big bang, lo que da universos que son paralelos en el tiempo.
Multiverso paisaje	Combinando cosmología inflacionaria y teoría de cuerdas, las muchas formas diferentes para las dimensiones extra de la teoría de cuerdas dan lugar a muchos universos burbuja diferentes.
Multiverso cuántico	La mecánica cuántica sugiere que cada posibilidad encarnada en sus ondas de probabilidad se realiza en uno de un inmenso conjunto de universos paralelos.
Multiverso holográfico	El principio holográfico afirma que nuestro universo es exactamente reflejado por fenómenos que tienen lugar en una lejana superficie frontera, un universo paralelo físicamente equivalente.
Multiverso simulado	Los saltos tecnológicos sugieren que los universos simulados pueden ser posibles algún día.
Multiverso final	El principio de fecundidad afirma que todo universo posible es un universo real, obviando con ello la pregunta de por qué una posibilidad —la nuestra— es es-

pecial. Estos universos ejemplifican todas las ecuaciones matemáticas posibles.

Lo mismo que sucede con el metafórico libro de la naturaleza, sucede también con el libro que usted está leyendo. En este último capítulo me encantaría reunir todas las piezas y responder a la pregunta más esencial del tema: ¿universo o multiverso? Pero no puedo hacerlo. Ésa es la naturaleza de las exploraciones que rozan los límites del conocimiento. En su lugar, para captar un atisbo de hacia dónde podría orientarse el concepto de multiverso, así como resaltar los puntos esenciales de dónde está ahora, he aquí cinco preguntas fundamentales con las que los físicos seguirán luchando en los años venideros.

¿Es fundamental la pauta copernicana?

Regularidades y pautas, evidentes en observaciones y en matemáticas, son esenciales para formular leyes físicas. Pautas de un tipo diferente, en la naturaleza de las leyes físicas aceptadas por cada generación sucesiva, también son reveladoras. Tales pautas reflejan cómo los descubrimientos científicos han cambiado la perspectiva de la humanidad sobre su lugar en el orden cósmico. Durante casi cinco siglos, la progresión copernicana ha sido un tema dominante. Desde la salida y la puesta del Sol hasta el movimiento de las constelaciones en el cielo nocturno y al papel protagonista que cada uno de nosotros desempeñamos en el mundo interior de nuestra mente, hay una abundante experiencia con claves que sugieren que somos un núcleo central en torno al cual da vueltas el cosmos. Pero los métodos objetivos de la investigación científica han corregido continuamente esta perspectiva. Una y otra vez hemos encontrado que

si no estuviéramos aquí, el orden cósmico apenas diferiría. Hemos tenido que abandonar nuestra creencia en que la Tierra ocupa un lugar central entre nuestros vecinos cósmicos, que el Sol ocupa un lugar central en la galaxia, que la Vía Láctea ocupa un lugar central entre las galaxias, e incluso que los protones, neutrones y electrones —la materia de la que estamos hechos— ocupan un lugar central en la receta cósmica. Hubo un tiempo en que cualquier evidencia en contra de delirios de grandeza colectivos largo tiempo mantenidos se veía como un asalto frontal a la dignidad humana. Con la práctica, hemos mejorado en nuestra forma de valorar la ilustración.

En este libro hemos viajado hacia lo que puede ser la culminación en la corrección copernicana. Quizá nuestro propio universo no sea central para ningún orden cósmico. Igual que sucede con nuestro planeta, estrella y galaxia, nuestro universo quizá sea tan solo uno entre muchos. La idea de que la realidad basada en un multiverso amplía la pauta copernicana, y quizá la completa, despierta curiosidad. Pero lo que eleva el concepto de multiverso por encima de la especulación ociosa es un hecho clave que hemos encontrado repetidamente. Los científicos no han ido a la caza de maneras de extender la revolución copernicana. No han estado urdiendo planes en laboratorios oscuros buscando maneras de completar la pauta copernicana. En su lugar, los científicos han estado haciendo lo que siempre hacen: utilizando datos y observaciones como guía, han estado formulando teorías matemáticas para describir los constituyentes fundamentales de la materia y las fuerzas que gobiernan el comportamiento, las interacciones y la evolución de estos constituyentes. Lo notable es que al seguir diligentemente el camino que marcan estas teorías, los científicos han tropezado con un universo potencial tras otro. Haga un viaje a lo largo de muchas de las autopistas científicas más transitadas, esté moderadamen-

te atento y encontrará un surtido variado de candidatos a multiverso. Son más difíciles de evitar que de encontrar.

Quizá descubrimientos futuros arrojarán una luz diferente sobre la serie de correcciones copernicanas. Pero desde nuestro punto de vista actual, cuanto más entendemos, menos centrales parecemos. Si las consideraciones científicas que hemos discutido en capítulos anteriores siguieran empujándonos hacia explicaciones basadas en multiversos, ése sería el paso natural hacia completar la revolución copernicana, un proceso de quinientos años.

¿Pueden ponerse a prueba teorías científicas que invocan un multiverso?

Aunque el concepto de multiverso encaja cómodamente en la plantilla copernicana, difiere cualitativamente de nuestros anteriores desplazamientos del centro de la escena. Al invocar dominios que quizá estén para siempre más allá de nuestra capacidad de examen —ya sea con algún grado de precisión o, en algunos casos, con ninguno en absoluto—, los multiversos erigen aparentemente barreras sustanciales al conocimiento científico. Independientemente de la idea que se tenga del lugar de la humanidad en la disposición cósmica, una hipótesis ampliamente mantenida ha sido que a través de la experimentación consciente, la observación y el cálculo matemático, la capacidad para obtener un conocimiento más profundo es ilimitada. Pero si somos parte de un multiverso, una expectativa razonable es que en el mejor de los casos sólo podemos aprender sobre nuestro universo, nuestro pequeño rincón del cosmos. Una preocupación más incómoda es que al invocar un multiverso

entramos en el dominio de teorías que no pueden ponerse a prueba, teorías que se basan en historias «así fue», que relegan todo lo que observamos a «la forma en que resultan ser las cosas».

Sin embargo, como hemos argumentado, el concepto de multiverso es más matizado. Hemos visto varias maneras en que una teoría que implica un multiverso podría ofrecer predicciones comprobables. Por ejemplo, aunque puede haber diferencias considerables entre los universos particulares que constituyen un multiverso, también pueden compartir algunas características, ya que todos ellos emergen de una teoría común. Un fallo en encontrar dichas características comunes, mediante medidas que emprendemos aquí en el universo al que tenemos acceso, probaría que la propuesta del multiverso es errónea. La confirmación de estas características, especialmente si son nuevas, aumentaría la confianza en que la propuesta era correcta.

O, si no hay características comunes a todos los universos, las correlaciones entre características físicas pueden proporcionar otra clase de predicciones comprobables. Por ejemplo, hemos visto que si todos los universos cuya lista de partículas incluye un electrón incluyeran también especies de partículas aún no detectadas, el fallo en encontrar la partícula mediante experimentos emprendidos aquí en nuestro universo descartaría la propuesta de multiverso. Una confirmación aumentaría la confianza. De modo análogo, correlaciones más complicadas —como tales, aquellos universos cuya lista de partículas incluye, digamos, todas las partículas conocidas (electrones, muones, quarks up, quarks down, etc.) necesariamente contienen una nueva especie de partículas— darían predicciones comprobables y falsables.

En ausencia de estas fuertes correlaciones, la manera en que las características físicas varían de un universo a otro también puede proporcionar predicciones. A lo largo de un multiverso

dado, por ejemplo, la constante cosmológica podría tomar un amplio abanico de valores. Pero si la inmensa mayoría de universos tuviera una constante cosmológica cuyo valor coincide con el que las medidas han encontrado aquí (como se ilustra en la Figura 7.1), la confianza en ese multiverso crecería merecidamente.

Finalmente, incluso si la mayoría de los universos en un multiverso dado tiene propiedades que difieren del nuestro, hay otro diagnóstico que podemos traer a colación. Podemos invocar razonamiento antrópico y considerar sólo los universos en el multiverso que son hospitalarios para nuestra forma de vida. Si la inmensa mayoría de esta subclase de universos tuviera propiedades que coinciden con las del nuestro —si nuestro universo es típico entre aquellos en los que las condiciones nos permiten vivir—, la confianza en el multiverso aumentaría. Si somos atípicos, podemos descartar la teoría, pero ésa es una limitación sabida del razonamiento estadístico. Resultados improbables pueden suceder y a veces lo hacen. Incluso así, cuanto menos típicos seamos, menos irresistible sería la propuesta de multiverso dada. Si entre todos los multiversos que soportan vida en un multiverso dado nuestro universo sobresaliera como un pulgar hinchado, eso proporcionaría un fuerte argumento para estimar irrelevante esa propuesta de multiverso.

Por consiguiente, para sondear cuantitativamente una propuesta de multiverso, debemos determinar la demografía de los universos que lo pueblan. No basta con saber los posibles universos que admite la propuesta de multiverso; debemos determinar las características detalladas de los universos reales a los que da lugar la propuesta. Esto requiere comprender los procesos cosmológicos que traen a la existencia a los diversos universos de un multiverso dado. Las predicciones comprobables pueden emerger entonces de la forma en que varían las características físicas de un universo a otro a lo largo del multiverso.

Si esta secuencia de evaluaciones da resultados precisos es algo que sólo puede evaluarse multiverso a multiverso. Pero la conclusión es que las teorías que incluyen otros universos — dominios a los que no podemos acceder ahora o quizá nunca — aún pueden proporcionar predicciones sometibles a prueba, y con ello falsables.

¿Podemos poner a prueba las teorías de multiverso que hemos encontrado?

Para la investigación teórica, la intuición física es vital. Los teóricos necesitan explorar una desconcertante serie de posibilidades. ¿Debería ensayar esta ecuación o esa otra, invocar esta pauta o ésa? Los mejores físicos tienen intuiciones claras y maravillosamente precisas acerca de qué direcciones son prometedoras y cuáles son probablemente estériles. Pero eso sucede entre bastidores. Cuando se discuten las propuestas científicas, no se juzgan por intuiciones. Sólo una regla es relevante: la capacidad de una propuesta para explicar o predecir datos experimentales y observaciones astronómicas.

En ello reside la singular belleza de la ciencia. Cuando luchamos por una comprensión más profunda, debemos dejar un amplio campo de exploración a nuestra imaginación creadora. Debemos estar dispuestos a abandonar ideas convencionales y marcos establecidos. Pero a diferencia de muchas otras actividades humanas a través de las que se canaliza el impulso creativo, la ciencia suministra un veredicto final, una valoración intrínseca de lo que es correcto y lo que no lo es.

Una complicación de la vida científica a finales del siglo XX y principios del siglo XXI es que algunas de nuestras ideas teóri-

cas han sobrepasado nuestra capacidad de poner a prueba u observar. La teoría de cuerdas ha sido durante un tiempo el paradigma de esta situación; la posibilidad de que seamos parte de un multiverso proporciona un ejemplo aún más extremo. Yo he fijado una receta general para poner a prueba una propuesta de multiverso, pero en nuestro nivel de conocimiento presente ninguna de las teorías de multiverso que hemos encontrado satisface por ahora los criterios. Con la investigación en curso, esta situación podría mejorar mucho.

Nuestras investigaciones del multiverso paisaje, por ejemplo, están en sus etapas iniciales. El conjunto de universos posibles en teoría de cuerdas —el paisaje de cuerdas— se ilustra esquemáticamente en la Figura 6.4, pero aún están por dibujar los mapas detallados de este terreno montañoso. Como los antiguos navegantes, tenemos una idea aproximada de lo que hay ahí fuera, pero serán necesarias extensas exploraciones matemáticas para cartografiar el terreno. Con dicho conocimiento, el próximo paso será determinar cómo están distribuidos estos universos potenciales a lo largo del correspondiente multiverso paisaje. El proceso físico esencial, la creación de universos burbuja mediante efecto túnel cuántico (ilustrada en la Figura 6.6 y la Figura 6.7), está bien entendido en teoría, pero aún tiene que ser examinado con profundidad cuantitativa en teoría de cuerdas. Varios grupos de investigación (incluyendo el mío) han emprendido un reconocimiento inicial, pero todavía hay un vasto terreno por explorar. Como hemos visto en capítulos anteriores, una variedad de incertidumbres similares afecta también a las otras propuestas de multiverso.

Nadie sabe si se necesitarán años, décadas o incluso más tiempo de avances teóricos y observacionales para extraer predicciones detalladas a partir de un multiverso dado. Si persistiera la situación actual, nos enfrentaríamos a una elección. ¿Definimos la ciencia —la «ciencia respetable»— como algo que in-

cluye solamente esas ideas, esos dominios y esas posibilidades que caen dentro de la capacidad de poner a prueba u observar por parte de seres humanos contemporáneos sobre el planeta Tierra? ¿O adoptamos una visión más amplia y consideramos como «científicas» ideas que podrían ponerse a prueba con avances tecnológicos que podemos imaginar que se consigan en los próximos cien años? ¿Los próximos doscientos años? ¿Más tiempo? ¿O adoptamos una visión aún más amplia y permitimos que la ciencia siga todos los caminos que deja ver, que viaje en direcciones que irradian desde conceptos experimentalmente confirmados pero que pueden llevar nuestra teorización a dominios ocultos que están, quizá permanentemente, fuera del alcance humano?

No hay una respuesta clara. Es aquí donde el gusto personal entra en juego. Yo entiendo bien el impulso para restringir las investigaciones científicas a esas proposiciones que pueden ser puestas a prueba ahora o en futuro próximo; después de todo, así es como construimos el edificio científico. Pero encuentro provinciano acotar nuestro pensamiento por los límites arbitrarios que nos impone el dónde estamos, cuándo estamos y quiénes somos. La realidad trasciende estos límites, de modo que cabe esperar que más pronto o más tarde también lo hará la búsqueda de verdades más profundas.

Mi gusto es por lo expansivo. Pero yo trazo la línea en ideas que no tienen posibilidad de ser confrontadas significativamente por el experimento o la observación, no debido a la fragilidad humana u obstáculos técnicos, sino debido a la naturaleza inherente de las propuestas. De los multiversos que hemos considerado, solo la versión completa del multiverso final cae en esta tierra de nadie. Si se incluyen absolutamente todos los universos posibles, entonces no importa lo que midamos u observemos, el multiverso final admitirá y abrazará nuestro resultado. Los otros ocho universos, tal como se resumen en la Ta-

bla 11.1, evitan esta trampa. Cada uno de ellos emerge de una lógica y bien motivada cadena de razonamientos, y cada uno de ellos está abierto a juicio. Si las observaciones proporcionaran pruebas convincentes de que la extensión espacial es finita, el multiverso mosaico dejaría de ser considerado. Si la confianza en la cosmología inflacionaria se erosionase, quizá porque datos más precisos del fondo cósmico de microondas sólo puedan explicarse suponiendo curvas de energía potencial del inflatón retorcidas (y por ello poco convincentes), la prominencia del multiverso inflacionario también se reduciría.[174] Si la teoría de cuerdas sufriera un revés teórico, quizá por el descubrimiento de un sutil fallo matemático que demostrara que la teoría es inconsistente (como inicialmente pensaron los primeros investigadores), la motivación para sus diversos multiversos se evaporaría. A la inversa, las observaciones de pautas en la radiación de fondo de microondas esperable de una colisión de burbujas podrían proporcionar pruebas directas en apoyo del multiverso inflacionario. Los experimentos en aceleradores en busca de partículas supersimétricas, indicios de energía perdida y miniagujeros negros podrían reforzar la teoría de cuerdas y el multiverso brana, aunque pruebas de colisiones de burbujas también podrían ofrecer apoyo para la variedad paisaje. La detección de huellas de ondas gravitatorias procedentes del universo primitivo, o la carencia de las mismas, podría distinguir entre la cosmología basada en el paradigma inflacionario y la del multiverso cíclico.

La mecánica cuántica, en su versión de muchos mundos, da lugar al multiverso cuántico. Si la investigación futura mostrara que las ecuaciones de la mecánica cuántica, por fiables que hubieran sido hasta entonces, requerían pequeñas modificaciones para encajar datos más refinados, este tipo de multiverso podría descartarse. Una modificación de la teoría cuántica que comprometiera la propiedad de linealidad (en la que nos basamos

extensamente en el capítulo 8) haría precisamente eso. También hemos señalado que hay tests en teoría del multiverso cuántico, experimentos cuyos resultados dependen de si la imagen de muchos mundos de Everett es o no correcta. Los experimentos están más allá de lo que podemos llevar a cabo ahora, y quizá siempre, pero ello se debe a que son fantásticamente difíciles, y no a que alguna característica inherente del propio multiverso cuántico los haga fundamentalmente irrealizables.

El multiverso holográfico emerge de consideraciones de teorías establecidas —la relatividad general y la mecánica cuántica — y recibe su apoyo teórico más fuerte de la teoría de cuerdas. Cálculos basados en holografía están entrando ya en contacto tentativo con resultados experimentales en el Colisionador de Iones Pesados Relativistas, y todo indica que tales vínculos experimentales se harán más robustos en el futuro. Que se vea el multiverso holográfico meramente como un artificio matemático útil o como prueba de la realidad holográfica es cuestión de opinión. Tenemos que esperar a trabajos futuros, teóricos y experimentales, para construir un argumento más fuerte para la interpretación física.

El multiverso simulado, al menos en teoría, también podría estar vinculado a una versión reducida del multiverso final que incluye solo universos basados en estructuras matemáticas computables. A diferencia de la versión completa del multiverso final, esta encarnación más limitada tiene una historia inicial que lo eleva por encima de la mera aserción. Los usuarios, reales y simulados, que están detrás del multiverso simulado estarán simulando, por definición, estructuras matemáticas computables, y con ello tendrán la capacidad de generar esta parte del multiverso final.

El multiverso simulado no se basa en ninguna estructura teórica sino en el incesante aumento de la potencia de computación. La hipótesis clave es que la capacidad de sentir no está

ligada fundamentalmente a un sustrato concreto —el cerebro— sino que es una propiedad emergente de cierta variedad de procesamiento de información. Es una proposición muy cuestionable, a favor y en contra de la cual se han presentado argumentos apasionados. Quizá una futura investigación sobre el cerebro y la naturaleza de la conciencia descarte la idea de máquinas pensantes auto-conscientes. O quizá no. Hay, sin embargo, un modo evidente de dirimir esta propuesta de multiverso. Si nuestros descendientes llegaran algún día a observar, o entrar en interacción, o visitar virtualmente, o hacerse parte de un mundo simulado convincente, la cuestión quedaría zanjada para cualquier fin práctico.

Ganar intuición experimental u observacional sobre la validez de las propuestas de multiverso es casi una quimera. Pero no es una imposibilidad. Y puesto que la ganancia potencial es inmensa, si el curso natural de la exploración teórica nos lleva a la exploración de multiversos, debemos seguir este camino para ver adónde conduce.

¿Cómo afecta un multiverso simulado a la naturaleza de la explicación científica?

A veces la ciencia se centra en los detalles. Nos dice por qué los planetas se mueven en órbitas elípticas, por qué el cielo es azul, por qué el agua es transparente, por qué mi mesa de trabajo es sólida. Por familiares que estos hechos puedan ser, es maravilloso que seamos capaces de explicarlos. A veces la ciencia adopta una visión más general. Revela que vivimos dentro de una galaxia que contiene algunos cientos de miles de millones de estrellas, establece que la nuestra es tan sólo una entre

cientos de miles de millones de galaxias, y proporciona pruebas de una energía oscura invisible que permea cada ranura de este vasto escenario. Mirando sólo cien años atrás, a un tiempo en que se pensaba que el universo era estático y estaba poblado solamente por la Vía Láctea, tenemos buenas razones para celebrar el magnífico cuadro que la ciencia ha pintado desde entonces.

A veces la ciencia hace algo más. A veces nos reta a reexaminar nuestra visión de la propia ciencia. El marco científico usual, con siglos de antigüedad, concibe que al describir un sistema físico, un físico tiene que especificar tres cosas. Hemos visto las tres en diversos contextos, pero es útil que los volvamos a reunir aquí. Lo primero son las ecuaciones matemáticas que describen las leyes físicas relevantes (por ejemplo, podrían ser las leyes del movimiento de Newton, las ecuaciones de Maxwell para la electricidad y el magnetismo, o la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica). En segundo lugar están los valores numéricos de todas las constantes que aparecen en las ecuaciones matemáticas (por ejemplo, las constantes que determinan la intensidad intrínseca de la gravedad y de las fuerzas electromagnéticas, o las que determinan las masas de las partículas elementales). Tercero, los físicos deben especificar las «condiciones iniciales» del sistema (tales como que una bola de béisbol es golpeada desde la base del bateador a una velocidad concreta en una dirección concreta, o que un electrón parte con un 50 por 100 de probabilidades de ser encontrado en la tumba de Grant y una probabilidad igual de ser encontrado en Strawberry Fields). Entonces las ecuaciones determinan cómo serán las cosas en un tiempo posterior. Tanto la física clásica como la cuántica se adscriben a este marco; sólo difieren en que la física clásica se propone contarnos cómo serán las cosas definitivamente en un momento dado, mientras que la física

cuántica proporciona la probabilidad de que las cosas sean de una manera u otra.

Cuando se trata de predecir dónde aterrizará una pelota de béisbol, o cómo se moverá un electrón en un chip de un computador (o en un modelo de Manhattan), este proceso de tres pasos es demostrablemente potente. Pero cuando se trata de describir la totalidad de la realidad, los tres pasos nos invitan a plantear preguntas más profundas: ¿podemos explicar las condiciones iniciales?, ¿cómo eran las cosas en un instante que se supone anterior a todos? ¿Podemos explicar los valores de las constantes —las masas de las partículas, intensidades de las fuerzas y demás— de las que dependen dichas leyes? ¿Podemos explicar por qué un conjunto concreto de ecuaciones matemáticas describe uno u otro aspecto del universo físico?

Las diversas propuestas de multiverso que hemos discutido tienen el potencial de cambiar profundamente nuestro pensamiento sobre estas cuestiones. En el multiverso mosaico, las leyes físicas a lo largo de los universos constituyentes son las mismas, pero las disposiciones de partículas difieren; diferentes disposiciones de partículas ahora reflejan diferentes condiciones iniciales en el pasado. Por consiguiente, en este multiverso nuestra perspectiva sobre la cuestión de por qué las condiciones iniciales en nuestro universo eran de una manera u otra cambia. Las condiciones iniciales pueden variar, y generalmente lo harán, de un universo a otro, de modo que no hay una explicación fundamental para una disposición particular. Pedir tal explicación es plantear la pregunta equivocada; es invocar mentalidad de universo único en un escenario multiverso. La pregunta que deberíamos hacer en su lugar es si en alguna parte del multiverso hay un universo cuya disposición de partículas, y con ello las condiciones iniciales, coincide con la que vemos aquí. Mejor aún, ¿podemos demostrar que tales universos abundan? Si es así, la profunda pregunta de las condiciones ini-

ciales se explicaría con un encogimiento de hombros; en tal multiverso, las condiciones iniciales de nuestro universo no necesitarían más explicación que el hecho de que en algún lugar de Nueva York hay una tienda de zapatos que tiene su número.

En el multiverso inflacionario, las «constantes» de la naturaleza pueden variar, y generalmente lo harán, de un universo burbuja a otro. Recordemos del capítulo 3 que las diferencias ambientales —los diferentes valores del campo de Higgs que permean cada burbuja— dan lugar a diferentes masas de partículas y propiedades de las fuerzas. Lo mismo es válido en el multiverso brana, el multiverso cíclico y el multiverso paisaje, donde la forma de las dimensiones extra de la teoría de cuerdas, junto con diversas diferencias en campos y flujos, dan lugar a universos con diferentes características —desde la masa del electrón hasta si siquiera hay un electrón, hasta la intensidad del electromagnetismo, hasta si hay una fuerza electromagnética, hasta el valor de la constante cosmológica, y así sucesivamente—. En el contexto de estos multiversos, pedir una explicación de las propiedades de partículas y fuerzas es una vez más plantear la pregunta equivocada; es una pregunta traída de un pensamiento de universo único. En su lugar, deberíamos preguntar si en cualquiera de estos multiversos hay un universo con las propiedades físicas que medimos. Mejor sería demostrar que abundan los universos con las características físicas del nuestro, o que al menos abundan entre todos los universos que favorecen la vida tal como la conocemos. Pero igual que no tiene sentido buscar *la* palabra con que Shakespeare escribió *Macbeth*, tampoco tiene sentido pedir a *las* ecuaciones que seleccionen los valores de las características físicas concretas que vemos aquí.

Los multiversos simulado y final son harina de otro costal; no emergen de teorías físicas concretas. Pese a todo, también ellos tienen el potencial de cambiar la naturaleza de nuestras

preguntas. En estos multiversos, las leyes matemáticas que gobiernan los universos individuales varían de uno a otro. Así pues, igual que sucede con las condiciones iniciales y las constantes de la naturaleza variables, leyes que varían sugieren que es equivocado pedir una explicación de las leyes concretas que operan aquí. Diferentes universos tienen leyes diferentes; nosotros experimentamos las que experimentamos porque están entre las leyes compatibles con nuestra existencia.

En conjunto, vemos que las propuestas de multiverso resumidas en la Tabla 11.1 hacen triviales tres aspectos primarios del marco científico estándar que en un escenario de universo único son un profundo misterio. En varios multiversos, las condiciones iniciales, las constantes de la naturaleza e incluso las leyes matemáticas ya no necesitan explicación.

¿Deberíamos creer en las matemáticas?

El premio Nobel Steven Weinberg escribió en cierta ocasión: «Nuestro error no es que tomemos nuestras teorías demasiado en serio, sino que no las tomamos suficientemente en serio. Siempre es difícil comprender que estos números y ecuaciones con los que jugamos en nuestra mesa de trabajo tienen algo que ver con el mundo real».[175] Weinberg se refería a los resultados pioneros de Ralph Alpher, Robert Herman y George Gamow sobre la radiación cósmica de fondo de microondas, que describí en el capítulo 3. Aunque la radiación predicha es una consecuencia directa de la relatividad general combinada con física cosmológica básica, solo alcanzó prominencia después de ser descubierta teóricamente dos veces, con una docena de

años de separación, y ser observada luego gracias a una feliz casualidad.

Por supuesto, el comentario de Weinberg tiene que aplicarse con cuidado. Aunque *su* mesa de trabajo ha albergado una gran cantidad de matemáticas que se han mostrado relevantes para el mundo real, pocas de las ecuaciones con las que nosotros los teóricos tratamos ascienden a ese nivel. En ausencia de resultados experimentales u observacionales convincentes, decidir qué matemáticas deberían tomarse en serio tiene tanto de arte como de ciencia.

De hecho, esta cuestión es central para todo lo que hemos discutido en este libro; también ha dado forma al título del libro. La amplitud de las propuestas de multiverso en la Tabla 11.1 podría sugerir un panorama de realidades ocultas. Pero he titulado este libro en singular para reflejar el tema único y unívocamente poderoso que subyace en todas ellas: la capacidad de las matemáticas para revelar verdades secretas sobre la marcha del mundo. Siglos de descubrimientos han hecho esto muy evidente; transformaciones monumentales en la física han surgido una y otra vez de seguir firmemente la guía de las matemáticas. La propia danza compleja de Einstein con las matemáticas proporciona un caso de estudio revelador.

A finales del siglo XIX, cuando James Clerk Maxwell comprendió que la luz era una onda electromagnética, sus ecuaciones mostraban que la velocidad de la luz debería ser de unos trescientos mil kilómetros por segundo, un valor muy próximo al que habían medido los experimentadores. Un angustioso cabo suelto era que sus ecuaciones dejaban sin responder la pregunta: ¿trescientos mil kilómetros por segundo con relación a qué? Los científicos llegaron a una solución de compromiso en la que una sustancia invisible que permeaba el espacio, el «éter», ofrecía el patrón de reposo invisible. Pero a comienzos del siglo XX, Einstein afirmó que los científicos tenían que tomarse

más en serio las ecuaciones de Maxwell. Si las ecuaciones de Maxwell no hacían referencia a un patrón de reposo, entonces no había necesidad de un patrón de reposo; la velocidad de la luz, declaró Einstein con firmeza, es trescientos mil kilómetros por segundo con relación a *cualquier cosa*. Aunque los detalles tienen interés histórico, estoy describiendo este episodio por lo que tiene de más importante: cualquiera tiene acceso a las ecuaciones de Maxwell, pero se necesitó el genio de Einstein para aceptar plenamente las matemáticas. Y con esa jugada, Einstein llegó a la teoría de la relatividad especial, que dio un vuelco a siglos de pensamiento con respecto al espacio, el tiempo, la materia y la energía.

Durante la década siguiente, mientras desarrollaba la teoría de la relatividad general, Einstein llegó a estar íntimamente familiarizado con vastas áreas de las matemáticas de las que la mayoría de los físicos de entonces sabía poco o nada. Conforme se acercaba a tientas hacia las ecuaciones finales de la relatividad general, Einstein hizo gala de una habilidad de maestro para moldear estas construcciones matemáticas con la mano firme de la intuición física. Unos años más tarde, cuando recibió la buena noticia de que las observaciones del eclipse solar de 1919 confirmaban la predicción de la relatividad general de que la luz estelar debería seguir trayectorias curvas, Einstein comentó confiadamente que si los resultados hubieran sido diferentes, «lo habría sentido por el buen Dios, porque la teoría es correcta». Estoy seguro de que datos convincentes en contra de la relatividad general habrían cambiado la opinión de Einstein, pero el comentario capta muy bien cómo un conjunto de ecuaciones matemáticas, gracias a su lógica interna, su belleza intrínseca y su aplicabilidad de amplio alcance, puede aparentemente irradiar realidad.

Sin embargo, había un límite al grado en que Einstein estaba dispuesto a seguir sus propias matemáticas. Einstein no tomó

la teoría de la relatividad general «suficientemente en serio» como para predecir la predicción que hacía de los agujeros negros, o su predicción de que el universo se estaba expandiendo. Como hemos visto, otros, incluidos Friedmann, Lemaître y Schwarzschild, aceptaron las ecuaciones de Einstein más decididamente que él, y sus logros han fijado el curso del conocimiento cosmológico durante casi un siglo. Por el contrario, durante sus últimos veinte años de vida, aproximadamente, Einstein se embarcó en investigaciones matemáticas, luchando apasionadamente por el preciado logro de una teoría unificada de la física. Cuando valoramos este trabajo basados en lo que conocemos ahora, no podemos dejar de concluir que durante esos años Einstein se estaba dejando guiar *en exceso* —algunos podrían decir ciegamente— por el conjunto de ecuaciones con las que se rodeaba continuamente. Y así, incluso Einstein, en diversos momentos de su vida, tomó la decisión incorrecta con respecto a qué ecuaciones tomar seriamente y cuáles no.

La tercera revolución en la moderna física teórica, la mecánica cuántica, ofrece otro caso de estudio de relevancia directa para la historia que he contado en este libro. Schrödinger desarrolló su ecuación de evolución de las ondas cuánticas en 1926. Durante décadas, la ecuación se veía relevante sólo en el dominio de las cosas pequeñas: moléculas, átomos y partículas. Pero en 1957, Hugh Everett se hacía eco de la demanda maxwelliana de Einstein medio siglo antes: tomar las matemáticas en serio. Everett argumentaba que la ecuación de Schrödinger debería aplicarse a todo porque todas las cosas materiales, independientemente de su tamaño, están hechas de moléculas, átomos y partículas subatómicas. Y como hemos visto, esto llevó a Everett a la aproximación de los muchos mundos a la mecánica cuántica y al multiverso cuántico. Pasados más de cincuenta años desde entonces, todavía no sabemos si la aproximación de Everett es correcta. Pero tomando en serio —totalmente en se-

rio— las matemáticas que subyacen en la teoría cuántica, quizá él haya descubierto una de las revelaciones más profundas de la exploración científica.

Las otras propuestas de multiverso se basan también en una creencia en que las matemáticas están cosidas en el tejido de la realidad. El multiverso final lleva esa perspectiva a su más extrema encarnación; las matemáticas, según el multiverso final, son la realidad. Pero incluso con su visión menos panóptica de la conexión entre matemáticas y realidad, las otras teorías de multiverso en la Tabla 11.1 deben su génesis a números y ecuaciones con los que juegan teóricos sentados ante mesas —y garabateando en cuadernos, y escribiendo en pizarras, y programando computadores—. Ya sea invocando la relatividad general, la mecánica cuántica, la teoría de cuerdas o, más en general, la intuición matemática, las entradas en la Tabla 11.1 aparecen sólo porque suponemos que la teorización matemática puede guiarnos hacia verdades ocultas. Sólo el tiempo nos dirá si esta hipótesis toma suficientemente en serio las teorías matemáticas subyacentes, o quizá no suficientemente en serio.

Si algunas o todas las matemáticas que nos han impulsado a pensar sobre mundos paralelos se muestra relevantes para la realidad, la famosa pregunta de Einstein acerca de si el universo tiene las propiedades que tiene simplemente porque no es posible ningún otro universo, tendría una respuesta definitiva: no. Nuestro universo no es el único posible. Sus propiedades podrían haber sido diferentes. Y en muchas de las propuestas de multiverso, las propiedades de los otros universos miembros serían diferentes. A su vez, buscar una explicación fundamental de por qué ciertas cosas son como son no tendría sentido. En su lugar, la probabilidad estadística o la pura casualidad estarían firmemente insertas en nuestra comprensión de un cosmos profundo e inmenso.

No sé si las cosas resultarán así. Nadie lo sabe. Pero sólo mediante un audaz compromiso podemos conocer nuestros propios límites. Sólo mediante la búsqueda racional de teorías, incluso las que nos introducen en dominios extraños y poco familiares, tenemos una oportunidad de revelar la extensión de la realidad.



BRIAN GREENE, doctor por la Universidad de Oxford, es en la actualidad profesor de física y de matemáticas en la Universidad de Columbia. Ampliamente reconocido por su serie de descubrimientos sobre la teoría de supercuerdas, ha colaborado como investigador en más de una veintena de países y ha editado, junto con S. T. Yau, *Mirror Symmetry* II (1996) y, con Costas Efthimiou, Fields, *Strings and Duality* (1997). En Crítica ha publicado *El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría definitiva* (2001) y *El tejido del Cosmos. Espacio, tiempo y la textura de la realidad* (2006).

Notas

[1] La posibilidad de que nuestro universo sea una lámina flotando en un dominio de dimensiones más altas se remonta a un artículo de dos renombrados físicos rusos —«Do We Live Inside a Domain Wall?», V. A. Rubakov y M. E. Shaposhnikov, *Physics Letters B* 125 (26 de mayo de 1983): 136— y no implica a la teoría de cuerdas. La versión en la que me centraré en el capítulo 5 surge de avances en la teoría de cuerdas a mediados de los años noventa. <<

[2] La cita procede del número de marzo de 1933 de *The Literary Digest*. Vale la pena señalar que la exactitud de esta cita ha sido recientemente cuestionada por el historiador de la ciencia danés Helge Kragh (ver su *Cosmology and Controversy*, Princeton, Princeton University Press, 1999), quien sugiere que puede ser una reinterpretación de un reportaje de *Newsweek* anterior a dicho año en el que Einstein se estaba refiriendo al origen de los rayos cósmicos. Lo que sí es cierto, no obstante, es que para entonces Einstein había abandonado su creencia en que el universo era estático y había aceptado la cosmología dinámica que surgía de sus ecuaciones originales de la relatividad general. <<

[3] Esta ley nos da la fuerza de atracción gravitatoria, F, entre dos objetos, dadas las masas m_1 y m_2 de cada uno, y la distancia, r, entre ambos. Matemáticamente, la ley se lee: $F = Gm_1m_2/r^2$, donde G representa la constante de Newton —un número medido experimentalmente que especifica la intensidad intrínseca de la fuerza gravitatoria—. <<

[4] Es más fácil imaginar el espacio curvo que el tiempo curvo, y por esto es por lo que muchas divulgaciones de la gravedad einsteniana se centran solamente en el primero. Sin embargo, en el caso de la gravedad generada por objetos familiares como la Tierra y el Sol, es en realidad la curvatura del tiempo —no del espacio— la que ejerce el impacto dominante. Como ilustración, pensemos en dos relojes, uno en el suelo y otro en lo alto del Empire State. Puesto que el reloj en el suelo está más próximo al centro de la Tierra, experimenta una gravedad ligeramente más intensa que el reloj que está a gran altura sobre Manhattan. La relatividad general muestra que debido a esto, el ritmo al que transcurre el tiempo en cada reloj será ligeramente diferente; el reloj del suelo correrá un poco más lento (milmillonésimas de segundo por año) que el reloj elevado. El desfase temporal es un ejemplo de lo que se entiende por qué el tiempo esté curvado o distorsionado. La relatividad general establece que los objetos se mueven hacia regiones donde el tiempo transcurre más lentamente; en cierto sentido, todos los objetos «quieren» envejecer lo más lentamente posible. Desde una perspectiva einsteniana, eso explica por qué un objeto cae cuando uno lo suelta. <<

[5] Para el lector con inclinación matemática, las ecuaciones de Einstein son $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ donde $g_{\mu\nu}$ es la métrica del espacio tiempo, $R_{\mu\nu}$ es el tensor de curvatura de Ricci, R es la curvatura escalar, G es la constante de Newton, y $T_{\mu\nu}$ es el tensor energía-momento. <<

[6] En las décadas transcurridas desde esta famosa confirmación de la relatividad general, se han planteado algunas dudas con respecto a la fiabilidad de los resultados. Para que la luz de las estrellas lejanas que pasa rozando el Sol fuera visible, las observaciones tuvieron que realizarse durante un eclipse solar; por desgracia, el mal tiempo dificultó tomar fotografías claras del

eclipse solar de 1919. La duda es si Eddington y sus colaboradores podrían haber estado influidos por el conocimiento previo del resultado que estaban buscando, de modo que al descartar fotografías que juzgaban poco fiables debido a interferencias meteorológicas, eliminaron un número desproporcionado que contenían datos que parecían no encajar en la teoría de Einstein. Un reciente y completo estudio de Daniel Kennefick (ver www.arxiv.org, paper arXiv:0709.0685, que, entre otras consideraciones, tiene en cuenta una moderna reevaluación de las placas fotográficas tomadas en 1919) argumenta de forma convincente que la confirmación de 1919 de la relatividad general es realmente fiable. <<

[7] Para el lector con inclinación matemática, las ecuaciones de Einstein para la relatividad general en este contexto se reducen a $\left(\frac{da/dt}{a}\right) = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2}$. La variable *a*(*t*) es el factor de escala del universo —un número cuyo valor, como su nombre indica, fija la escala de distancias entre objetos (si el valor de *a*(*t*) en dos instantes diferentes difiere, digamos, en un factor 2, entonces la distancia entre dos galaxias particulares también diferiría entre dichos instantes en un factor 2)—, *G* es la constante de Newton, *r* es la densidad de materia/energía, y *k* es un parámetro cuyo valor puede ser 1, 0 o –1 dependiendo de si la forma del espacio es esférica, euclidiana («plana») o hiperbólica. La forma de esta ecuación se suele atribuir a Alexander Friedmann y, como tal, se le llama ecuación de Friedmann. <<

[8] El lector con inclinación matemática debería advertir dos cosas. Primero, en relatividad general normalmente definimos coordenadas que son dependientes de la materia que contiene el espacio: utilizamos galaxias como portadores de coordenadas (que actúan como si cada galaxia tuviera un conjunto particular de coordenadas «pintado» en ella, denominadas coordenadas comóviles). Así, para identificar una región específica del espa-

cio, normalmente hacemos referencia a la materia que lo ocupa. Entonces, una paráfrasis más precisa del texto sería: la región de espacio que ocupa un grupo particular de *N* galaxias en el instante t_1 tendrá un volumen mayor en un instante posterior t_2. Segundo, la afirmación intuitivamente razonable que considera que la densidad de materia y energía cambia cuando el espacio se expande o se contrae hace una hipótesis implícita con respecto a la ecuación de estado para materia y energía. Hay situaciones, como pronto encontraremos, en las que el espacio puede expandirse o contraerse aunque la densidad de una contribución concreta a la energía —la densidad de energía de la denominada constante cosmológica— permanece constante. De hecho, hay escenarios todavía más exóticos en los que el espacio puede expandirse mientras que la densidad de energía aumenta. Esto puede suceder porque, en ciertas circunstancias, la gravedad puede proporcionar una fuente de energía. El punto importante del párrafo es que en su forma original las ecuaciones de la relatividad general no son compatibles con un universo estático. <<

[9] Pronto veremos que Einstein abandonó su universo estático cuando lo confrontó con datos astronómicos que mostraban que el universo se está expandiendo. Vale la pena señalar, no obstante, que sus dudas sobre el universo estático eran anteriores a los datos. El físico Willem de Sitter le indicó a Einstein que su universo estático era inestable: hágase un poco más grande, y crecerá; hágase un poco más pequeño, y se contraerá. A los físicos no les gustan las soluciones que requieren condiciones perfectas y no perturbadas para persistir. <<

[10] En el modelo del big bang, la expansión del espacio se ve como algo parecido al movimiento ascendente de una bola lanzada hacia arriba: la gravedad atractiva tira del movimiento ascendente de la bola y con ello frena su movimiento; análogamente, la gravedad atractiva tira del movimiento hacia fuera de

las galaxias y con ello frena su movimiento. En ninguno de los casos el movimiento en curso requiere una fuerza repulsiva. Sin embargo, usted aún puede preguntar: su brazo lanzó la bola al cielo, pero ¿qué «lanzó» al universo espacial en su expansión hacia fuera? Volveremos a esta pregunta en el capítulo 3, donde veremos que la teoría moderna postula un breve brote de gravedad repulsiva que actúa durante los más tempranos momentos de la historia cósmica. Veremos también que datos más refinados han proporcionado pruebas de que la expansión del espacio *no* se está frenando con el tiempo, lo que ha producido una sorprendente —como capítulos posteriores dejarán claro — y potencialmente profunda resurrección de la constante cosmológica.

El descubrimiento de la expansión del espacio fue un punto crucial en la cosmología moderna. Además de en las contribuciones de Hubble, el logro se basaba en trabajos e ideas de muchos otros, incluidos Vesto Slipher, Harlow Shapley y Milton Humason. <<

[11] Un toro bidimensional suele representarse como un *donut* con agujero. Un proceso de dos pasos muestra que esta imagen concuerda con la descripción proporcionada en el texto. Cuando declaramos que rebasar el borde izquierdo de la pantalla le lleva de nuevo al borde derecho, eso es equivalente a identificar todo el borde derecho con el borde izquierdo. Si la pantalla fuera flexible (hecha de plástico, por ejemplo), esta identificación podría hacerse explícitamente enrollando la pantalla en una forma cilíndrica y juntando los bordes derecho e izquierdo. Cuando decimos que rebasar el borde superior le lleva al borde inferior, eso también es equivalente a identificar dichos bordes. Podemos hacerlo explícito mediante una segunda manipulación en la que doblamos el cilindro y juntamos los bordes circulares superior e inferior. La forma resultante tiene la apariencia normal de un *donut*. Un aspecto engañoso de estas manipulaciones

es que la superficie del *donut* parece curva; si se cubriera con pintura reflectante, su reflejo estaría distorsionado. Éste es un artificio que resulta de representar el toro como un objeto situado dentro de un entorno tridimensional. Pero intrínsecamente, como una superficie bidimensional, el toro no está curvado. Es plano, como queda claro cuando se representa como una pantalla de videojuego plana. Por eso es por lo que, en el texto, me centro en la descripción más fundamental como una forma cuyos bordes se identifican a pares. <<

[12] El lector con inclinación matemática advertirá que por «rebanado y emparejamiento adecuados» me estoy refiriendo a tomar cocientes de espacios de recubrimiento simplemente conexos por diversos grupos de isometría discretos. <<

[13] Dada nuestra discusión anterior de cómo la materia curva la región en la que está inmersa, usted podría estar preguntándose cómo puede *no* haber curvatura incluso si hay materia. La explicación es que, en general, una presencia uniforme de materia curva el *espacio-tiempo*; en este caso particular, hay curvatura espacial cero pero curvatura espacio-temporal distinta de cero. <<

[14] La cantidad citada es válida para la época actual. En el universo primitivo, la densidad crítica era más alta. <<

[15] Si el universo fuera estático, la luz habría estado viajando durante los últimos 13.700 millones de años, y la que acaba de llegarnos habría sido emitida desde una distancia de 13.700 millones de años luz. En un universo en expansión, el objeto que emitió la luz ha continuado alejándose durante los miles de millones de años que la luz estuvo en tránsito. Cuando recibimos la luz, el objeto está muy lejos —mucho más lejos— que 13.700 millones de años luz. Un cálculo sencillo utilizando la relatividad general muestra que el objeto (suponiendo que aún existe y viaja a caballo de la ola del espacio) estaría ahora a

unos 41.000 años luz. Esto significa que cuando miramos en el espacio podemos, en principio, ver luz procedente de fuentes que están ahora a aproximadamente 41.000 millones de años-luz. En este sentido, el universo observable tiene un diámetro de unos 82.000 millones de años luz. La luz procedente de objetos a una distancia mayor que ésta no habría tenido aún tiempo suficiente para llegarnos, y por ello están más allá de nuestro horizonte cósmico. <<

[16] En lenguaje impreciso, usted puede concebir que debido a la mecánica cuántica las partículas experimentan siempre lo que yo llamo «agitación cuántica»: una especie de inevitable vibración cuántica aleatoria que afecta a la propia idea de que la partícula tiene una posición y una velocidad (momento) precisas. En este sentido, cambios en la posición/velocidad tan pequeños que son comparables a las agitaciones cuánticas están dentro del «ruido» de la mecánica cuántica, y en consecuencia no son significativos.

En un lenguaje más riguroso. Si usted multiplica la imprecisión en la medida de posición por la imprecisión en la medida del momento, el resultado —la incertidumbre— es siempre mayor que un número llamado *constante de Planck*, con el nombre de Max Planck, uno de los pioneros de la física cuántica. En particular, esto implica que finas resoluciones en la medida de la posición de una partícula (pequeña imprecisión en la medida de la posición) implican necesariamente gran incertidumbre en la medida de su momento y, por asociación, su energía. Puesto que la energía es siempre limitada, la resolución en las medidas de posición también está limitada.

Notamos también que siempre aplicaremos estos conceptos en un dominio espacial finito, generalmente en regiones del tamaño del horizonte cósmico actual (como en la próxima sección). Una región de tamaño finito, por grande que sea, implica una incertidumbre máxima en las medidas de posición. Si se

supone que una partícula está en una región dada, la incertidumbre de su posición no es mayor, por supuesto, que el tamaño de la región. Esta incertidumbre máxima en la posición implica entonces, por el principio de incertidumbre, un mínimo de incertidumbre en las medidas del momento, es decir, una resolución limitada en las medidas del momento. Junto con la resolución limitada en las medidas de posición, vemos la reducción de un número infinito a un número finito de posibles configuraciones distintas de la posición y la velocidad de una partícula.

Usted todavía podría preguntarse cuál es la barrera para construir un aparato capaz de medir la posición de una partícula con precisión cada vez mayor. También es cuestión de energía. Como en el texto, si usted quiere medir la posición de una partícula con precisión cada vez mayor, necesita utilizar una sonda cada vez más refinada. Para determinar si una mosca está en una habitación, puede apuntar con una linterna difusa ordinaria. Para determinar si un electrón está en una cavidad, necesita iluminarlo con el haz definido de un láser potente. Y para determinar la posición del electrón con precisión cada vez mayor, necesita hacer dicho láser cada vez más potente. Ahora bien, cuando un láser cada vez más potente incide en un electrón, imparte un impulso cada vez mayor a su velocidad. Así, la conclusión es que la precisión en la determinación de las posiciones de las partículas se da a costa de cambios enormes en las velocidades de las partículas, y con ello cambios enormes en las energías de las partículas. Si hay un límite a la energía que pueden tener las partículas, como siempre lo habrá, hay un límite a la precisión con que pueden resolverse sus posiciones.

La energía limitada en un dominio espacial limitado da así resolución finita en medidas de posición tanto como de velocidad. <<

[17] Discutiré más en detalle los agujeros negros en capítulos posteriores. Aquí me atendré a la noción familiar, ahora bien arraigada en la cultura popular, de una región espacial —pensemos en ella como una bola en el espacio— cuya atracción gravitatoria es tan fuerte que nada que cruce su borde puede escapar. Cuanto mayor es la masa del agujero negro, mayor es su tamaño, de modo que cuando algo cae dentro no sólo hace que aumente la masa del agujero negro, sino que también aumente su tamaño. <<

[18] La forma más directa de hacer este cálculo es acudir a un resultado que describiré en términos no técnicos en el capítulo 9: la entropía de un agujero negro —el logaritmo del número de estados cuánticos distintos— es proporcional al área de su superficie medida en unidades de Planck al cuadrado. Un agujero negro que llena nuestro horizonte cósmico tendría un radio de unos 10^{28} centímetros, o aproximadamente 10^{61} unidades de Planck. Por lo tanto, su entropía sería de aproximadamente 10^{122} en unidades de Planck al cuadrado. Así, el número total de estados distintos es aproximadamente 10 elevado a la potencia 10^{122}, o $10^{10^{122}}$. <<

[19] Quizá esté usted preguntándose por qué no estoy incorporando también campos. Como veremos, partículas y campos son lenguajes complementarios —un campo puede describirse en términos de las partículas de que está compuesto, igual que un océano puede describirse en términos de sus moléculas de agua constituyentes—. Elegir entre usar un lenguaje de partícula o un lenguaje de campo es básicamente una cuestión de conveniencia. <<

[20] La distancia que puede recorrer la luz en un intervalo de tiempo dado depende sensiblemente de la velocidad a la que se expande el espacio. En capítulos posteriores encontraremos evidencia de que el ritmo de expansión del espacio se está acelerando. Si es así, hay un límite a cuánto puede viajar la luz a

través del espacio, incluso si esperamos un tiempo arbitrariamente largo. Regiones distantes del espacio se estarían alejando de nosotros tan rápidamente que la luz que emitimos no podría alcanzarlas; asimismo, la luz que ellas emiten no podría llegarnos. Esto significaría que los horizontes cósmicos —la porción del espacio con la que podemos intercambiar señales luminosas — no crecerían en tamaño indefinidamente. (Para el lector con inclinación matemática, las fórmulas esenciales están en el capítulo 6, nota 7.) <<

[21] G. Ellis y G. Bundrit estudiaron dominios duplicados en un universo clásico infinito; J. Garriga y A. Vilenkin estudiaron dichos dominios en el contexto cuántico. <<

[22] Una diferencia con respecto al trabajo anterior era la perspectiva de Dicke, que se centraba en la posibilidad de un universo oscilante que recorrería repetidamente una serie de ciclos —big bang, expansión, contracción, *big crunch*, big bang de nuevo—. En cualquier ciclo dado habría radiación remanente llenando el espacio. <<

[23] Famosas series de televisión de los años cincuenta y sesenta en EE. UU. (*N. del t.*) <<

[24] Vale la pena señalar que incluso si no tienen motores de reacción, las galaxias muestran en general algún movimiento además del que aparece de la expansión del espacio; normalmente es resultado de fuerzas gravitatorias intergalácticas a gran escala, así como del movimiento intrínseco de la nube de gas arremolinada a partir de la que se formaron las estrellas en las galaxias. Tal movimiento se denomina *velocidad peculiar*, y en general es suficientemente pequeño como para que pueda ser ignorado sin problemas para fines cosmológicos. <<

[25] El problema del horizonte es sutil, y mi descripción de la solución de la cosmología inflacionaria no es completamente estándar, así que para el lector interesado permítame desarro-

llarla aquí con más detalle. Primero el problema, una vez más: consideremos dos regiones en el cielo nocturno tan alejadas una de otra que nunca han estado comunicadas. Y para concretar, digamos que en cada región hay un observador que controla un termostato que fija la temperatura de su región. Los observadores quieren que las dos regiones tengan la misma temperatura, pero puesto que los observadores no han podido comunicarse, no saben cómo fijar sus respectivos termostatos. La idea natural es que, puesto que hace miles de millones de años los observadores estaban mucho más próximos, habría sido fácil para ellos, tiempo atrás, haberse comunicado y con ello haber asegurado que las dos regiones tuvieran la misma temperatura. Sin embargo, como se ha señalado en el texto principal, en la teoría del big bang estándar este razonamiento falla. He aquí el por qué con más detalle. En la teoría del big bang estándar el universo se está expandiendo, pero debido al tirón atractivo de la gravedad, el ritmo de expansión se frena con el tiempo. Es muy parecido a lo que sucede cuando se lanza una bola al aire. Durante su ascenso se aleja rápidamente, pero debido a la gravedad terrestre se frena continuamente. El frenado de la expansión espacial tiene un efecto profundo. Utilizaré la analogía de la bola lanzada para explicar la idea esencial. Imagine una bola que asciende, digamos, durante seis segundos. Puesto que inicialmente viaja rápidamente (cuando deja la mano), podría cubrir la primera mitad del recorrido en sólo dos segundos, pero debido a su velocidad decreciente necesita cuatro segundos más para cubrir la segunda mitad del recorrido. En el instante central del intervalo de tiempo, tres segundos, estaba entonces más allá de la marca media de la distancia. Algo análogo sucede con la expansión espacial que se frena con el tiempo: en el punto medio de la historia cósmica, nuestros dos observadores estarían separados por más de la mitad de su distancia actual. Pensemos en lo que esto significa. Los dos observadores esta-

rían más próximos, pero para ellos habría sido más difícil —no más fácil— comunicarse. Las señales que envía un observador tendrían la mitad de tiempo para llegar al otro, pero la distancia que tendrían que atravesar las señales es más de la mitad de la que es hoy. Disponer de la mitad de tiempo para comunicarse a través de más de la mitad de su separación actual sólo hace más difícil la comunicación.

La distancia entre objetos es así sólo una consideración cuando se analiza su capacidad para influirse mutuamente. La otra consideración esencial es la cantidad de tiempo que ha transcurrido desde el big bang, pues esto restringe la distancia que podría haber recorrido cualquier pretendida influencia. En el big bang estándar, aunque todo estaba más próximo en el pasado, el universo también se estaba expandiendo más rápidamente, lo que da como resultado un tiempo menor, proporcionalmente hablando, para que se ejerzan las influencias.

La solución que ofrece la cosmología inflacionaria consiste en insertar una fase en los más tempranos momentos de la historia cósmica en la que el ritmo de expansión del espacio no decrece como lo hace la velocidad de la bola arrojada hacia arriba; en su lugar, la expansión del espacio deja de frenarse y luego se acelera continuamente: la expansión se acelera. Por el mismo razonamiento que acabamos de seguir, en el punto medio de dicha fase inflacionaria nuestros dos observadores estarán separados por menos de la mitad de su distancia al final de la fase. Y disponer de la mitad de tiempo para comunicar a través de menos de la mitad de distancia significa que es más fácil para ellos comunicarse en tiempos anteriores. Con más generalidad, en momentos cada vez más tempranos, la expansión acelerada significa que hay más tiempo, proporcionalmente hablando —y no menos— para que se ejerzan las influencias. Esto habría permitido que regiones hoy distantes se hayan comu-

nicado fácilmente en el universo primitivo, lo que explica la temperatura común que tienen ahora.

Puesto que la expansión acelerada da lugar a una expansión del espacio mucho mayor que en la teoría del big bang estándar, las dos regiones habrían estado mucho más próximas en el comienzo de la inflación que en un momento comparable en la teoría del big bang estándar. Esta disparidad de tamaño en el universo muy primitivo es una manera equivalente de entender por qué la comunicación entre las regiones, que se habría mostrado imposible en el big bang estándar, puede conseguirse fácilmente en la teoría inflacionaria. Si en un momento dado después del inicio la distancia entre dos regiones es menor, es más fácil para ellas intercambiar señales.

Tomando en serio las ecuaciones de la expansión a tiempos arbitrariamente anteriores (y para ser concretos, imaginemos que el espacio tiene forma esférica), vemos también que las dos regiones se habrían separado inicialmente más rápidamente en el big bang estándar que en el modelo inflacionario: así es como llegaron a separarse mucho más en el big bang estándar comparado con su separación en la teoría inflacionaria. En este sentido, el marco inflacionario incluye un período de tiempo durante el que el ritmo de separación entre estas regiones es más lento que en el marco big bang usual.

A menudo, al describir la cosmología inflacionaria el foco se pone solamente en el fantástico incremento en la velocidad de expansión en el marco convencional, y no en una reducción en la velocidad. La diferencia en la descripción deriva de qué características físicas se comparan entre los dos marcos. Si se comparan las trayectorias de dos regiones separadas una distancia dada en el universo muy primitivo, entonces en la teoría inflacionaria dichas regiones se separan mucho más rápidamente que en la teoría del big bang estándar; hoy también están mucho más separadas en la teoría inflacionaria que en el big bang

convencional. Pero si se consideran dos regiones hoy a una distancia dada (como las dos regiones en lados opuestos del cielo nocturno sobre la que nos hemos centrado), la descripción que he dado es relevante. A saber, en un momento dado en el universo muy primitivo, dichas regiones estaban mucho más próximas, y se habían estado separando mucho más lentamente en una teoría que invoca expansión inflacionaria comparada con una que no lo hace. El papel de la expansión inflacionaria es maquillar la salida más lenta alejando dichas regiones aún más rápidamente, lo que asegura que llegan a la misma localización en el cielo que tendrían en la teoría del big bang estándar.

Un tratamiento más completo del problema del horizonte incluiría una especificación más detallada de las condiciones a partir de las cuales emerge la expansión inflacionaria, así como los procesos posteriores por los que, por ejemplo, se produce la radiación cósmica de fondo de microondas. Pero esta discusión ilustra la distinción esencial entre expansión acelerada y decelerada.<<

[26] De modo equivalente, la expansión acelerada superrápida significa que las regiones hoy distantes habrían estado mucho más próximas en el universo primitivo que lo que sugiere la teoría del big bang tradicional, lo que asegura que pudo establecerse una temperatura común antes de que el brote las separara. <<

[27] Note que al apretar la bolsa, usted inyecta energía en ella, y puesto que masa y energía dan lugar a la distorsión gravitatoria resultante, el incremento en peso será debido en parte al aumento en energía. Lo importante, sin embargo, es que el aumento en la propia presión también contribuye al incremento en peso. (Note también que, para ser precisos, deberíamos imaginar que se hace este «experimento» en una cámara de vacío, de modo que no necesitamos considerar las fuerzas de flotación debidas al aire que rodea a la bolsa). Para ejemplos cotidia-

nos, el incremento es minúsculo. Sin embargo, en escenarios astrofísicos el aumento puede ser importante. De hecho, desempeña un papel en entender por qué, en ciertas situaciones, las estrellas colapsan necesariamente para formar agujeros negros. Las estrellas mantienen generalmente su equilibrio mediante un balance entre la presión que empuja hacia fuera, generada por procesos nucleares en el núcleo de la estrella, y la gravedad que tira hacia dentro, generada por la masa de la estrella. A medida que la estrella agota su combustible nuclear, la presión positiva decrece, lo que hace que la estrella se contraiga. Esto hace que todos sus constituyentes se aproximen y con ello aumenta su atracción gravitatoria. Para evitar más contracción se necesita presión adicional hacia fuera (que se etiqueta como presión positiva, como en el siguiente párrafo del texto). Pero la propia presión positiva adicional genera gravedad atractiva adicional, y así hace más urgente la necesidad de presión positiva adicional. En ciertas situaciones esto lleva a una inestabilidad en espiral: la presión positiva, que normalmente contrarrestaría el tirón hacia dentro de la gravedad, contribuye ahora tan fuertemente a ese mismo tirón hacia dentro que hace inevitable un completo colapso gravitatorio. La estrella implosionará y formará un agujero negro. <<

[28] Usted podría pensar que la presión negativa tiraría hacia dentro y por ello sería contraria a la gravedad repulsiva, que empuja hacia fuera. En realidad, una *presión uniforme*, no importa de qué signo, no empuja ni tira en absoluto. Sus tímpanos sólo se mueven cuando hay una presión no uniforme, menor en un lado que en el otro. El empuje repulsivo que estoy describiendo aquí es la *fuerza gravitatoria generada por la presencia de la presión negativa uniforme*. Éste es un punto difícil, pero esencial. Una vez más, mientras que la presencia de masa positiva o presión positiva genera gravedad atractiva, la presencia de presión negativa genera la menos familiar gravedad repulsiva. <<

[29] La expansión rápida del espacio se llama inflación, pero siguiendo el patrón histórico de poner nombres que terminan en «on» (electrón, protón, neutrón, muón, etc.), cuando los físicos se refieren al campo que impulsa la inflación, olvidan la última «i». De aquí, campo inflatón. <<

[30] Eric Cartman, a quien sus compañeros llaman «Culo gordo» por su obesidad, es uno de los deslenguados niños protagonistas de la serie de animación *South Park*. *(N. del t.)* <<

[31] En la aproximación a la inflación que acabo de describir, no hay una explicación fundamental de por qué el valor del campo inflatón empezaría en lo alto de la curva de energía potencial, ni de por qué la curva de energía potencial tendría la forma concreta que tiene. Éstas son hipótesis que hace la teoría. Versiones posteriores de la inflación, muy en especial una desarrollada por Andrei Linde llamada *inflación caótica*, encuentran que una curva de energía potencial más «ordinaria» (una forma parabólica sin sección plana que emerge de las ecuaciones matemáticas más sencillas para la energía potencial) también puede dar expansión inflacionaria. Para iniciar la expansión inflacionaria el valor del campo inflatón tiene que estar también en lo alto de su curva de energía potencial, pero las condiciones enormemente calientes que se esperan en el universo primitivo harían que esto suceda de forma natural. <<

[32] Para el lector diligente, déjeme señalar otro detalle. La rápida expansión del espacio en la cosmología inflacionaria implica un enfriamiento importante (igual que una rápida compresión del espacio, o de casi cualquier cosa, provoca un aumento en la temperatura). Pero cuando la inflación termina, el campo inflatón oscila en torno al mínimo de su curva de energía potencial, lo que transfiere su energía a un baño de partículas. El proceso se llama «recalentamiento» porque las partículas así producidas tendrán energía cinética y por ello pueden caracterizarse por una temperatura. Como luego el espacio continúa ex-

perimentando una expansión big bang más ordinaria (no inflacionaria), la temperatura del baño de partículas decrece continuamente. El punto importante, sin embargo, es que la uniformidad impuesta por la inflación proporciona condiciones uniformes para estos procesos, y por ello da resultados uniformes. <<

[33] Alan Guth era consciente de la naturaleza eterna de la inflación; Paul Steinhardt elaboró su realización matemática en ciertos contextos; Alexander Vilenkin la sacó a la luz en los términos más generales. <<

[34] El valor del campo inflatón determina la cantidad de energía y de presión negativa que distribuye a través del espacio. Cuanto mayor es la energía, mayor es la velocidad de expansión del espacio. A su vez, la rápida expansión del espacio tiene una retrorreacción sobre el propio campo inflatón: cuanto más rápida es la expansión del espacio, más violentamente fluctúan los valores del campo inflatón. <<

[35] Déjeme abordar una cuestión que quizá se le haya ocurrido a usted, y a la que volveremos en el capítulo 10. Cuando el espacio sufre expansión inflacionaria, su energía total aumenta: cuanto mayor es el volumen de espacio lleno con un campo inflatón, mayor es la energía total (si el espacio es infinitamente grande, la energía también es infinita: en este caso deberíamos hablar de la energía contenida en una región finita del espacio cuando la región se hace más grande). Lo que lleva de manera natural a preguntar: ¿cuál es la fuente de dicha energía? Para la situación análoga con la botella de champán, la fuente de la energía adicional en la botella procede de la fuerza ejercida por sus músculos. ¿Qué desempeña el papel de sus músculos en el cosmos en expansión? La respuesta es la gravedad. Mientras sus músculos eran el agente que permitía que se expanda el espacio disponible dentro de la botella (al sacar el corcho), la gravedad es el agente que permite que se expanda el espacio dis-

ponible en el cosmos. Es vital darse cuenta de que la energía del campo gravitatorio puede ser arbitrariamente negativa. Consideremos dos partículas que caen una hacia otra bajo su mutua atracción gravitatoria. La gravedad hace que las partículas se aproximen cada vez a mayor velocidad, y cuando lo hacen, su energía cinética se hace cada vez más positiva. El campo gravitatorio puede suministrar a las partículas dicha energía positiva porque la gravedad puede reducir su propia reserva de energía, que se hace arbitrariamente negativa en el proceso: cuanto más se aproximan las partículas, más energía positiva hay que inyectar para superar la fuerza de gravedad y separar las partículas de nuevo. La gravedad es entonces como un banco que tiene una línea de crédito sin límite y por ello puede prestar cantidades inacabables de energía; el campo gravitatorio puede suministrar cantidades inacabables de energía porque su propia energía puede hacerse cada vez más negativa. Y ésa es la fuente de energía que impulsa la expansión inflacionaria. <<

[36] Utilizaré el término «universo burbuja», aunque la imagen de un «universo de bolsillo» que se abre dentro del ambiente lleno de inflatón también es buena (ese término fue acuñado por Alan Guth). <<

[37] Entre los que desempeñaron un papel destacado en este trabajo estaban Viatcheslav Mukhanov, Gennady Chibisov, Stephen Hawking, Alexei Starobinski, Alan Guth, So-Young Pi, James Bardeen, Paul Steinhardt y Michael Turner. <<

[38] Para el lector con inclinación matemática, una descripción más precisa del eje horizontal en la Figura 3.5 es como sigue: consideremos la esfera bidimensional que comprende los puntos en el espacio en el instante en que empiezan a fluir libremente los fotones del fondo cósmico de microondas. Como sucede con cualquier dos-esfera, un conjunto de coordenadas conveniente para este lugar geométrico son las coordenadas angulares de un sistema de coordenadas polares esféricas. La

temperatura de la radiación cósmica de fondo de microondas puede verse como una función de tales coordenadas angulares y, como tal, puede descomponerse en una serie de Fourier utilizando como base los armónicos esféricos estándar Y_l^m *(q,f)*. El eje vertical en la Figura 3.5 está relacionado con el tamaño de los coeficientes de cada modo en este desarrollo —más a la derecha en el eje horizontal corresponde a una menor separación angular—. Para los detalles técnicos, véase por ejemplo el excelente libro *Modern Cosmology*, de Scott Dodelson (San Diego, California; Academia Press, 2003). <<

[39] Hago hincapié en que son partículas *fundamentales*, como electrones y quarks, porque en el caso de las partículas compuestas, como protones y neutrones (cada uno formado por tres quarks), buena parte de la masa procede de interacciones entre los constituyentes (la energía que llevan los gluones de la fuerza nuclear fuerte, que une los quarks dentro de protones y neutrones, aporta la mayor parte de la masa de estas partículas compuestas). <<

[40] De forma más precisa, no es la intensidad del campo gravitatorio, *per se*, la que determina el frenado del tiempo, sino más bien la intensidad del potencial gravitatorio. Por ejemplo, si usted estuviera colgado dentro de una cavidad esférica en el centro de una estrella masiva, no sentiría una fuerza gravitatoria, pero puesto que usted estaría en el profundo interior de un pozo de potencial gravitatorio, el tiempo correría para usted más lentamente que para alguien lejos de la estrella. <<

[41] Este resultado (e ideas estrechamente relacionadas) fue encontrado por varios investigadores en diferentes contextos, y fue expresado de forma más explícita por Alexander Vilenkin y también por Sydney Coleman y Frank De Luccia. <<

[42] Usted recordará que en nuestra discusión del multiverso mosaico suponíamos que las disposiciones de partículas varia-

rían aleatoriamente de una región a otra. La conexión entre los multiversos mosaico e inflacionario también nos permite hacer buena esa hipótesis. Un universo burbuja se forma en una región dada cuando cae el valor del campo inflatón; a medida que lo hace, la energía que contenía el inflatón se convierte en partículas. La disposición precisa de estas partículas en cualquier instante está determinada por el valor preciso del inflatón durante el proceso de conversión. Pero puesto que el campo inflatón está sometido a fluctuaciones cuánticas, a medida que cae su valor estará sometido a variaciones aleatorias —las mismas variaciones aleatorias que dan lugar a la pauta de manchas ligeramente más calientes y ligeramente más frías en la Figura 3.4—. Cuando se consideran a lo largo de las regiones en un universo burbuja, estas fluctuaciones implican que el valor del inflatón exhibirá variaciones cuánticas aleatorias. Y esta aleatoriedad asegura la aleatoriedad de las distribuciones de partículas resultantes. Por esto es por lo que esperamos que cualquier disposición de partículas, tales como la responsable de todo lo que vemos precisamente ahora, se repita con tanta frecuencia como cualquier otra. <<

[43] Agradezco a Walter Isaacson las comunicaciones personales sobre esta y otras cuestiones históricas referentes a Einstein. <<

[44] Con algo más de detalle, las ideas de Glashow, Salam y Weinberg sugerían que las fuerzas electromagnética y débil eran aspectos de una *fuerza electrodébil* combinada, una teoría que fue confirmada por experimentos en aceleradores a finales de los años setenta y principios de los años ochenta del siglo pasado. Glashow y Georgi fueron un paso más lejos y sugirieron que las fuerzas electrodébil y fuerte eran aspectos de una fuerza aún más fundamental, una aproximación que se llama *gran unificación*. No obstante, la versión más simple de gran unificación quedó descartada cuando los científicos no pudieron observar

una de sus predicciones: que los protones deberían desintegrarse ocasionalmente. No obstante, hay muchas otras versiones de gran unificación que siguen siendo experimentalmente viables, puesto que, por ejemplo, el ritmo de desintegración del protón que predicen es tan lento que los experimentos existentes no tendrían todavía la sensibilidad necesaria para detectarla. Sin embargo, incluso si la gran unificación no es apoyada por los datos, está ya más allá de toda duda que las tres fuerzas no gravitatorias pueden describirse utilizando el mismo lenguaje matemático de la teoría cuántica de campos. <<

[45] El descubrimiento de la teoría de supercuerdas generó otras aproximaciones teóricas, estrechamente relacionadas, que buscan una teoría unificada de las fuerzas de la naturaleza. En particular, la *teoría cuántica de campos supersimétrica*, y su extensión gravitatoria, la *supergravedad*, han sido vigorosamente seguidas desde mediados de los años setenta. La teoría cuántica de campos supersimétrica y la supergravedad se basan en el nuevo principio de supersimetría, que fue descubierto dentro de la teoría de supercuerdas, pero estas aproximaciones incorporan supersimetría en teorías convencionales de partículas puntuales. Más adelante en este capítulo discutiremos brevemente la supersimetría, pero para el lector con inclinación matemática señalaré aquí que la supersimetría es la última simetría disponible (más allá de la simetría de rotación, la simetría de traslación, la simetría de Lorentz y, más en general, la simetría de Poincaré) de una teoría no trivial de partículas elementales. Relaciona partículas de diferente espín mecanocuántico, lo que establece un profundo parentesco matemático entre partículas que transmiten las fuerzas y partículas que constituyen la materia. La supergravedad es una extensión de la supersimetría que incluye la fuerza gravitatoria. En los primeros días de la investigación en teoría de cuerdas, los científicos se dieron cuenta de que los marcos de supersimetría y supergravedad emergían de un análi-

sis a baja energía de la teoría de cuerdas. A bajas energías no puede discernirse, en general, la naturaleza extendida de una cuerda, de modo que aparece como una partícula puntual. En correspondencia, como discutiremos en este capítulo, cuando se aplican a procesos de baja energía, las matemáticas de la teoría de cuerdas se transforman en las de la teoría cuántica de campos. Los científicos encuentran que, puesto que supersimetría y gravedad sobreviven a la transformación, la teoría de cuerdas a baja energía da lugar a una teoría cuántica de campos supersimétrica y a supergravedad. Más recientemente, como discutiremos en el capítulo 9, el vínculo entre teoría de campos supersimétrica y teoría de cuerdas se ha hecho aún más profundo. <<

[46] El lector informado puede hacer una excepción a mi afirmación de que cada campo está asociado a una partícula. Así, más exactamente, las pequeñas fluctuaciones de un campo en torno a un mínimo local de su potencial son generalmente interpretables como excitaciones de partículas. Eso es todo lo que necesitamos para la discusión actual. Adicionalmente, el lector informado notará que localizar una partícula en un punto es asimismo una idealización, porque —por el principio de incertidumbre— se necesitarían momento y energía infinitos para hacerlo. Una vez más, la esencia es que en la teoría cuántica de campos no hay, en principio, ningún límite a lo localizada que puede estar una partícula. <<

[47] Históricamente hablando, una técnica matemática conocida como *renormalización* se desarrolló para tratar las implicaciones cuantitativas de graves fluctuaciones cuánticas a pequeña escala (alta energía). Cuando se aplicaba a las teorías cuánticas de campos de las tres fuerzas no gravitatorias, la renormalización eliminaba las cantidades infinitas que habían aparecido en diversos cálculos, lo que permitía a los físicos generar predicciones con una fantástica aproximación. Sin embargo, cuando

la renormalización se aplicaba a las fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio, resultaba ineficaz: el método fallaba para eliminar los infinitos que aparecían al realizar cálculos cuánticos que incluyen la gravedad.

Desde un punto de vista más moderno, estos infinitos se ven ahora de una forma bastante diferente. Los físicos se han dado cuenta de que en el camino hacia una comprensión cada vez más profunda de las leyes de la naturaleza, una actitud razonable es que cualquier propuesta es provisional, y —si es relevante— es probable que sea capaz de describir la física sólo hasta una escala de longitud particular (o sólo hasta una escala de energía particular). Más allá de esto hay fenómenos que están fuera del alcance de la propuesta dada. Adoptando esta perspectiva, sería temerario extender la teoría a distancias más pequeñas que las que caen dentro de su arena de aplicabilidad (o a energías superiores a su arena de aplicabilidad). Y cuando se introducen estos límites (igual que se describe en el texto principal), nunca aparecen infinitos. En su lugar, los cálculos se emprenden dentro de una teoría cuyo rango de aplicabilidad está restringido de entrada. Esto significa que la capacidad de hacer predicciones se limita a los fenómenos que yacen dentro de los límites de la teoría; para distancias muy cortas (o energías muy altas) la teoría no da ninguna idea. El objetivo último de una teoría completa de la gravedad cuántica sería elevar los límites introducidos, lo que posibilitaría capacidades predictivas y cuantitativas en escalas arbitrarias. <<

[48] Para hacerse una idea de la procedencia de estos números concretos, note que la mecánica cuántica (discutida en el capítulo 8) asocia una onda a una partícula, de modo que cuanto más masiva es la partícula, más corta es su longitud de onda (la distancia entre crestas sucesivas de la onda). La relatividad general de Einstein asocia también una longitud a cualquier objeto: el tamaño al que habría que comprimir un objeto para con-

vertirlo en un agujero negro. Cuanto más masivo es el objeto, mayor es ese tamaño. Imagine entonces que empezamos con una partícula descrita por la mecánica cuántica y luego aumentamos lentamente su masa. A medida que lo hace, la onda cuántica de la partícula se hace más corta, mientras que su «tamaño de agujero negro» se hace más grande. Para una cierta masa, la longitud de onda cuántica y el tamaño de agujero negro se harán iguales, lo que fija una masa y tamaño de base en los que las consideraciones de mecánica cuántica y de relatividad general se hacen importantes. Cuando se hace cuantitativo este experimento mental, se encuentra que la masa y el tamaño son los citados en el texto —la masa de Planck y la longitud de Planck, respectivamente—. Para anticipar desarrollos posteriores, en el capítulo 9 discutiré el *principio holográfico*. Este principio utiliza la relatividad general y la física de agujeros negros para argumentar a favor de un límite muy particular sobre el número de grados de libertad físicos que pueden residir en cualquier volumen de espacio (una versión más refinada de la discusión en el capítulo 2 sobre el número de disposiciones de partículas diferentes dentro de un volumen de espacio; también mencionado en la nota 14 del capítulo 2). Si este principio es correcto, entonces el conflicto entre relatividad general y mecánica cuántica puede aparecer antes de que las distancias sean pequeñas y las curvaturas grandes. La mecánica cuántica prediría que un volumen enorme que contiene un gas de partículas de baja densidad tiene muchos más grados de libertad que los que permitiría el principio holográfico (que se basa en la relatividad general). <<

[49] El espín mecano-cuántico es un concepto sutil. Especialmente en teoría cuántica de campos, donde las partículas se consideran puntos, es difícil imaginar lo que significaría «girar». Lo que realmente sucede es que los experimentos muestran que las partículas pueden poseer una propiedad intrínseca que

se comporta de forma muy parecida a una cantidad invariable de momento angular. Además, la teoría cuántica muestra, y los experimentos confirman, que en general las partículas sólo tendrán un momento angular que es un múltiplo entero de una cantidad fundamental (la constante de Planck dividida por 2). Puesto que los objetos clásicos que giran poseen un momento angular intrínseco (uno, sin embargo, que no es invariable —cambia como cambia la velocidad de rotación del objeto—), los teóricos han tomado prestado el término «espín» [El verbo inglés *to spin* significa «girar». (*N. del t.*)] y lo han aplicado a esta situación cuántica análoga. De aquí el nombre «momento angular de espín». Aunque «girar como una peonza» ofrece una razonable imagen mental, es más exacto imaginar que las partículas están definidas no sólo por su masa, su carga eléctrica y sus cargas nucleares, sino también por el momento angular de espín intrínseco e inmutable que poseen. Igual que aceptamos la carga eléctrica de una partícula como una de sus características definitorias fundamentales, los experimentos establecen que lo mismo es cierto para su momento angular de espín. <<

[50] Si usted quisiera saber cómo supera la teoría de cuerdas los problemas que bloquearon intentos anteriores de unir gravedad y mecánica cuántica, vea *El universo elegante*, capítulo 6; para un esbozo, vea la nota 8. Para un resumen aún más breve, note que mientras que una partícula puntual existe en un único lugar, una cuerda, debido a que tiene longitud, está ligeramente dispersa. Esta dispersión, a su vez, diluye las estridentes fluctuaciones cuánticas de corta distancia que impedían avances previos. A finales de los años ochenta había pruebas sólidas de que la teoría de cuerdas fusionaba acertadamente la relatividad general y la mecánica cuántica; desarrollos más recientes (capítulo 9) hacen el argumento aplastante. <<

[51] Recordemos que la tensión entre relatividad general y mecánica cuántica surge de las potentes fluctuaciones cuánticas

del campo gravitatorio que agitan el espacio-tiempo de un modo tan violento que los métodos matemáticos tradicionales no pueden tratar. La incertidumbre cuántica nos dice que estas fluctuaciones se hacen cada vez más fuertes cuando se examina el espacio a escalas cada vez más pequeñas (que es la razón por la que no vemos estas fluctuaciones en la vida cotidiana). En concreto, los cálculos muestran que son las fluctuaciones enormemente energéticas sobre distancias menores que la de Planck las que hacen que las matemáticas se descontrolen (cuanto menor es la distancia, mayor es la energía de las fluctuaciones). Puesto que la teoría cuántica de campos describe las partículas como puntos sin extensión espacial, las distancias que sondean estas partículas pueden ser arbitrariamente pequeñas, y por ello las fluctuaciones cuánticas que sienten pueden ser arbitrariamente energéticas. La teoría de cuerdas cambia esto. Las cuerdas no son puntos; tienen extensión espacial. Esto implica que hay un límite a lo pequeña que puede ser una distancia accesible, incluso en principio, puesto que una cuerda no puede sondear una distancia menor que su propio tamaño. A su vez, un límite a la escala que puede sondearse se traduce en un límite a lo energéticas que pueden hacerse las fluctuaciones. Este límite se muestra suficiente para domeñar las matemáticas descontroladas, lo que permite que la teoría de cuerdas se fusione con la mecánica cuántica y la relatividad general. <<

[52] Si un objeto fuera verdaderamente unidimensional, no seríamos capaces de verlo directamente, puesto que no presentaría ninguna superficie en la que pudieran reflejarse los fotones y no tendría capacidad de producir sus propios fotones mediante transiciones atómicas. Así, cuando en el texto digo «ver», eso es un sustituto para cualquier medio de observación o experimentación que se pudiera utilizar para buscar pruebas de la extensión espacial de un objeto. El punto importante, entonces, es que cualquier extensión espacial menor que el poder de reso-

lución de su procedimiento experimental no será advertida por su experimento. <<

[53] «What Einstein Never Knew», documental NOVA, 1985. <<

[54] Más exactamente, la componente del universo más relevante para nuestra existencia sería completamente diferente. Puesto que las partículas familiares y los objetos que componen —estrellas, planetas, personas, etc.— equivalen a menos del 5 por 100 de la masa del universo, tal ruptura no afectaría a la inmensa mayoría del universo, al menos medida por la masa. Sin embargo, medida por su efecto sobre la vida tal como la conocemos, el cambio sería profundo. <<

[55] Las teorías cuánticas de campos ponen algunas tibias restricciones a sus parámetros internos. Para evitar ciertas clases inaceptables de comportamiento físico (violaciones de leyes de conservación críticas, violaciones de ciertas transformaciones de simetría y demás), puede haber restricciones sobre las cargas (eléctrica y también nuclear) de las partículas de la teoría. Adicionalmente, para asegurar que en todos los procesos físicos las probabilidades suman 1, también puede haber restricciones sobre las masas de las partículas. Pero incluso con estas restricciones, hay una amplia variación en los valores permitidos de las propiedades de las partículas. <<

[56] Algunos investigadores advertirán que incluso si ni el campo cuántico ni nuestra comprensión actual de la teoría de cuerdas proporcionan una explicación de las propiedades de las partículas, la cuestión es más apremiante en teoría de cuerdas. El punto es algo complicado, pero para quien tenga una mente técnica he aquí un resumen. En teoría cuántica de campos, las propiedades de las partículas —digamos sus masas, para concretar— están controladas por números que se insertan en las ecuaciones de la teoría. El hecho de que las ecuaciones de la

teoría cuántica de campos permiten que tales números varíen es el modo matemático de decir que la teoría cuántica de campos no determina las masas de las partículas, sino que más bien las toma como datos de entrada. En la teoría de cuerdas, la flexibilidad en las masas de las partículas tiene un origen matemático similar —las ecuaciones admiten números concretos que varían libremente—, pero la manifestación de esta flexibilidad es más significativa. Los números que varían libremente —números, es decir, que pueden variar sin coste en la energía— corresponden a la existencia de partículas sin masa. (Utilizando el lenguaje de las curvas de energía potencial introducidas en el capítulo 3, imagine una curva de energía potencial que es completamente plana, una línea horizontal. De la misma forma que caminar sobre un terreno perfectamente plano no tendría impacto en su energía potencial, cambiar el valor de un campo semejante no tendría coste en la energía. Puesto que la masa de una partícula corresponde a la curvatura de la curva de energía potencial de su campo cuántico en torno a su mínimo, los cuantos de tales campos no tienen masa). Números excesivos de partículas sin masa son una característica particularmente incómoda de cualquier teoría propuesta, puesto que hay límites rígidos sobre tales partículas que provienen tanto de datos de aceleradores como de observaciones cosmológicas. Para que la teoría de cuerdas sea viable es imperativo que estas partículas adquieran masa. En años recientes varios descubrimientos han mostrado maneras en que esto podría suceder, que tienen que ver con los flujos que pueden atravesar los agujeros en las formas de Calabi-Yau extradimensionales. Discutiré aspectos de estos desarrollos en el capítulo 5. <<

[57] No es imposible que los experimentos proporcionen pruebas sólidas en contra de la teoría de cuerdas. La estructura de la teoría de cuerdas asegura que todos los fenómenos deberían respetar ciertos principios básicos. Entre éstos están la *uni-*

tariedad (la suma de todas las probabilidades de todos los resultados posibles en un experimento dado debe ser 1) y la *invariancia Lorentz local* (en un dominio suficientemente pequeño son válidas las leyes de la relatividad especial), así como características más técnicas tales como *analiticidad* y *simetría cruzada* (el resultado de las colisiones entre partículas debe depender del momento de las partículas de una manera que respete un conjunto especial de criterios matemáticos). Si se encontraran pruebas —quizá en el Gran Colisionador de Hadrones— de que se viola alguno de estos principios, sería un reto reconciliar dichos datos con la teoría de cuerdas. (También sería un reto reconciliar dichos datos con el modelo estándar de la física de partículas, que también incorpora estos principios, pero la hipótesis subyacente es que el modelo estándar debe dar paso a algún tipo de nueva física en una escala de energías suficientemente alta, puesto que la teoría no incorpora la gravedad. Datos en conflicto con cualquiera de los principios enumerados argumentarían que la nueva física no es la teoría de cuerdas.) <<

[58] Es habitual hablar del centro de un agujero negro como si fuera una posición en el espacio. Pero no lo es. Es un instante en el tiempo. Cuando se cruza el horizonte de sucesos de un agujero negro, el tiempo y el espacio (la dirección radial) intercambian sus papeles. Si usted cae dentro de un agujero negro, por ejemplo, su movimiento radial representa avance a través del tiempo. Usted se ve entonces atraído hacia el centro del agujero negro de la misma forma que se ve atraído hacia el siguiente instante de tiempo. En este sentido, el centro de un agujero negro es similar a un instante final en el tiempo. <<

[59] Por muchas razones, la entropía es un concepto clave en física. En el caso discutido, la entropía se está utilizando como una herramienta de diagnóstico para determinar si la teoría de cuerdas está dejando fuera cualquier física esencial en su descripción de los agujeros negros. Si así fuera, el desorden del

agujero negro para cuyo cálculo se está utilizando la teoría de cuerdas no sería exacto. El hecho de que la respuesta coincide exactamente con la que encontraron Bekenstein y Hawking utilizando consideraciones muy diferentes es un signo de que la teoría de cuerdas ha recogido acertadamente la descripción física fundamental. Éste es un resultado muy alentador. Para más detalles, véase *El universo elegante*, capítulo 13. <<

[60] El primer indicio de este emparejamiento entre formas de Calabi-Yau vino del trabajo de Lance Dixon, e independientemente de Wolfgang Lerche, Nicholas Warner y Cumrun Vafa. Mi trabajo con Ronen Plesser encontró un método para producir los primeros ejemplos concretos de tales pares, a los que llamamos *pares espejo*, y a la relación entre ellos, *simetría espejo*. Plesser y yo demostramos también que cálculos difíciles en un miembro de un par espejo, que incluyen detalles aparentemente impenetrables tales como el número de esferas que pueden empaquetarse en la forma, podían traducirse en cálculos mucho más manejables en la forma espejo. Este resultado fue retomado por Philip Candelas, Xenia de la Ossa, Paul Green y Linda Parkes y puesto en práctica: ellos desarrollaron técnicas para evaluar explícitamente la igualdad que Plesser y yo habíamos establecido entre las fórmulas «difíciles» y «fáciles». Utilizando la fórmula «fácil», extrajeron información sobre su compañera difícil, que incluía los números asociados con el empaquetamiento de esferas dado en el texto. En los años transcurridos desde entonces, la simetría espejo se ha convertido en un campo de investigación por sí mismo, y se han establecido muchos resultados importantes. Para una historia detallada, véase Shing-Tung Yau y Steve Nadis, *The Shape of the Inner Shape* (New York: Basic Books, 2010). <<

[61] La afirmación de la teoría de cuerdas de haber unido satisfactoriamente mecánica cuántica y relatividad general se basa en la riqueza de cálculos que la apoyan, y se hace aún más con-

vincente por los resultados que encontraremos en el capítulo 9. <<

[62] Mecánica clásica: $\vec{F} = m\vec{a}$. Electromagnetismo: *d*F =*J;dF =0*. Mecánica cuántica: $H\psi = i\hbar\frac{d\psi}{dt}$. Relatividad general: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$. <<

[63] Me estoy refiriendo aquí a la constante de estructura fina, $a = \frac{e^2}{\hbar c}$ cuyo valor numérico (a energías típicas para procesos electromagnéticos) es aproximadamente 1/137 o 0,0073. <<

[64] Usted puede considerar esto como una gran generalización de los resultados citados en el capítulo 4, en la que diferentes formas para las dimensiones extra pueden dar lugar a modelos físicos idénticos. <<

[65] Witten argumentó que cuando el acoplamiento de cuerda de Tipo I se hace grande, la teoría se transforma en la teoría Heterótica-O con un acoplamiento que se hace pequeño, y viceversa; la teoría Tipo IIB a gran acoplamiento se transforma en *sí misma*, la teoría Tipo IIB pero con acoplamiento pequeño. Los casos de las teorías Heterótica-E y Tipo IIA son algo más sutiles (véase *El universo elegante*, capítulo 12, para los detalles), pero la imagen global es que las cinco teorías participan en una red de interrelaciones. <<

[66] Esto no era el resultado de una coincidencia matemática misteriosa. Más bien, en un sentido matemático preciso, las cuerdas son formas altamente simétricas, y era esta simetría la que eliminaba las inconsistencias. Véase la nota 4 para los detalles. <<

[67] Para el lector con inclinación matemática, lo especial sobre cuerdas, ingredientes unidimensionales, es que la física que describe su movimiento respeta un grupo de simetría de dimensión infinita. Es decir, cuando una cuerda se mueve, barre

una superficie bidimensional, y por eso el funcional de acción del que se derivan sus ecuaciones de movimiento es una teoría cuántica de campos bidimensional. Clásicamente, tales acciones bidimensionales son conformemente invariantes (invariantes bajo reescalados de la superficie bidimensional que conservan los ángulos), y tal simetría puede conservarse mecano-cuánticamente imponiendo varias restricciones (tales como restricciones sobre el número de dimensiones espacio-temporales a través de las que se mueve la cuerda, es decir, la dimensión del espacio-tiempo). El grupo conforme de transformaciones de simetría es de dimensión infinita, y esto resulta esencial para garantizar que el análisis cuántico perturbativo de una cuerda en movimiento es matemáticamente consistente. Por ejemplo, el número infinito de excitaciones de una cuerda en movimiento que de otro modo tendría norma negativa (que surge de la signatura negativa de la componente temporal de la métrica del espacio-tiempo) puede «rotarse» sistemáticamente utilizando el grupo de simetría de dimensión infinita. Para los detalles, el lector puede consultar M. Green, J. Schwarz y E. Witten, *Superstring Theory*, vol. I (Cambridge, Cambridge University Press, 1988). <<

[68] Como sucede con muchos descubrimientos importantes, hay que dar el crédito tanto a aquellos cuyas ideas prepararon el terreno como a aquellos cuyo trabajo estableció su importancia. Entre quienes desempeñaron un papel semejante para el descubrimiento de branas en la teoría de cuerdas están: Michael Duff, Paul Howe, Takeo Inami, Kelley Stelle, Eric Bergshoeff, Ergin Szegin, Paul Townsend, Chris Hull, Chris Pope, John Schwarz, Ashoke Sen, Andrew Strominger, Curtis Callan, Joe Polchinski, Petr Hořava, J. Dai, Robert Leigh, Hermann Nicolai y Bernard Dewitt. <<

[69] La primera revolución la constituyeron los resultados de John Schwarz y Michael Green, que lanzaron la moderna ver-

sión del tema. <<

[70] Si está siendo cuidadoso, usted advertirá que una rebanada de pan es en realidad tridimensional (anchura y altura en la superficie de la rebanada, pero también profundidad por el grosor de la rebanada), pero no se moleste por esto. El grosor del pan nos recordará que nuestras rebanadas son sustitutos visuales de las tres-branas. <<

[71] El lector diligente podría argumentar que el multiverso inflacionario también entreteje el tiempo de una manera fundamental, puesto que, después de todo, la frontera de nuestra burbuja marca el comienzo del tiempo en nuestro universo; más allá de nuestra burbuja es así más allá de nuestro tiempo. Aunque es cierto, mi punto aquí pretende ser más general —los multiversos discutidos hasta ahora emergen de análisis que se centran fundamentalmente en procesos que ocurren a lo largo del espacio—. En el multiverso que discutiremos ahora, el tiempo es central de entrada. <<

[72] Usted aún podría preguntar si toda la extensión del espacio en dimensiones más altas puede moverse, pero, por interesante que sea, no es relevante para nuestra discusión. <<

[73] Alexander Friedmann, *The World as Space and Time*, 1923, publicado en ruso, como cita H. Kragh, en «Continual Fascination; The Oscillating Universe in Modern Cosmology», *Science in Context* 22, n.° 4 (2009), 587-612. <<

[74] Para los lectores familiarizados con el rompecabezas de la flecha del tiempo, nótese que, en consonancia con las observaciones, estoy suponiendo que la entropía decrece hacia el pasado. Véase *El tejido del cosmos*, capítulo 6, para una discusión detallada. <<

[75] Como detalle interesante, los autores del modelo cíclico mundobrana invocan una aplicación especialmente utilitaria de la energía oscura (la energía oscura será discutida en detalle en

el capítulo 6). En la última fase de cada ciclo, la presencia de energía oscura en los mundobranas asegura un acuerdo con las observaciones actuales de expansión acelerada; esta expansión acelerada, a su vez, diluye la densidad de entropía, lo que fija el escenario para el próximo ciclo cosmológico. <<

[76] Grandes valores de flujo también tienden a desestabilizar una forma de Calabi-Yau dada para las dimensiones extra. Es decir, los flujos tienden a hacer que crezca la forma de Calabi-Yau, lo que rápidamente entra en conflicto con el criterio de que las dimensiones extra no sean visibles. <<

[77] Una observación sobre el lenguaje. En general, utilizo los términos «constante cosmológica» y «energía oscura» de forma intercambiable. Cuando necesito ser más preciso, tomo el valor de la constante cosmológica para denotar la *cantidad* de energía oscura dispersa en el espacio. Como se señaló antes, los físicos suelen utilizar el término «energía oscura» con más liberalidad, entendiendo por ella cualquier cosa que pueda simular o hacerse pasar por una constante cosmológica sobre escalas de tiempo razonablemente largas, pero que podría cambiar lentamente y, por ello, no ser realmente constante. <<

[78] George Gamow, *My World Line* (New York, Viking Adult, 1970); J. C. Pecker, carta al editor, *Physics Today*, mayo 1990, p. 117. <<

[79] Albert Einstein, *The Meaning of Relativity* (Princeton, Princeton University Press, 2004), p. 127. Nótese que Einstein utilizaba el término «miembro cosmológico» para lo que ahora llamamos la «constante cosmológica»; por claridad, he hecho esta sustitución en el texto. <<

[80] *The Collected Papers of Albert Einstein*, editados por Robert Schulmann *et al* (Princeton, Princeton University Press, 1998), p. 316. <<

[81] También es así como funciona la tecnología del cine en 3D: escogiendo de manera apropiada los desajustes espaciales en la pantalla de imágenes casi duplicadas, el cineasta hace que su cerebro interprete las paralajes resultantes como distancias diferentes, creando la ilusión de un ambiente 3D. <<

[82] Por supuesto, algunas cosas sí cambian. Como se ha señalado en las notas al capítulo 3, las galaxias tienen en general velocidades pequeñas al margen de la dilatación espacial. En el curso de escalas de tiempo cosmológicas, tal movimiento adicional puede alterar las relaciones de posición; tal movimiento puede dar también como resultado una variedad de interesantes sucesos astrofísicos tales como colisiones y fusiones de galaxias. No obstante, estas complicaciones pueden ignorarse sin problemas para el objetivo de explicar distancias cósmicas. <<

[83] Hay una complicación que no afecta a la idea esencial que he explicado, pero que entra en juego cuando se emprende el análisis científico descrito. Cuando los fotones viajan hacia nosotros desde una supernova dada, su densidad numérica se diluye a la manera que he expuesto. Sin embargo, están sometidas a otra disminución. En la próxima sección describiré cómo el estiramiento del espacio hace que la longitud de onda de los fotones se estire también y, en correspondencia, disminuya su energía —un efecto, como veremos, llamado *desplazamiento hacia el rojo*—. Como se explica allí, los astrónomos utilizan los datos del desplazamiento hacia el rojo para saber el tamaño que tenía el universo cuando se emitieron los fotones —un paso importante para determinar cómo ha variado la expansión del espacio a lo largo del tiempo—. Pero el estiramiento de los fotones —la disminución de su energía— tiene otro efecto. Acentúa el oscurecimiento de una fuente distante. Y así, para determinar adecuadamente la distancia de una supernova comparando sus brillos aparente e intrínseco, los astrónomos deben tener en cuenta no sólo la dilución de la densidad numérica de fotones

(como he descrito en el texto), sino también la disminución adicional de energía que viene del desplazamiento hacia el rojo. (De forma aún más precisa, este factor de dilución adicional debe aplicarse dos veces; el segundo factor de desplazamiento hacia el rojo da cuenta del ritmo al que los fotones llegan a ser análogamente estirados por la expansión cósmica). <<

[84] Interpretada de forma adecuada, la segunda respuesta que se propone para el significado de la distancia que se está midiendo también puede hacerse correcta. En el ejemplo de la expansión de la superficie de la Tierra, Nueva York, Austin y Los Ángeles se alejan unas de otras, pese a que cada una sigue ocupando la misma localización en la Tierra que ha tenido siempre. Las ciudades se separan porque la superficie se dilata, no porque alguien excava, las pone en una plataforma móvil y las traslada a un nuevo lugar. Análogamente, puesto que las galaxias se separan debido a la dilatación cósmica, también ocupan la misma localización en el espacio que han ocupado siempre. Usted puede considerar que están cosidas en el tejido espacial. Cuando el tejido se estira, las galaxias se alejan, pero cada una de ellas permanece ligada al mismo punto que ha ocupado siempre. Y así, incluso si la segunda y tercera respuestas parecen diferentes —la primera al centrarse en la distancia entre nosotros y la localización de una galaxia distante hace eones de tiempo, cuando la supernova emitió la luz que vemos ahora; la última al centrarse en la distancia actual entre nosotros y la localización actual de dicha galaxia— no lo son. La galaxia distante está ahora, y lo ha estado durante miles de millones de años, situada en una misma localización espacial. Sólo si se moviera a través del espacio en lugar de ir sólo en la ola del espacio que se dilata cambiaría su localización espacial. En este sentido, la segunda y tercera respuestas son en realidad la misma. <<

[85] Si el espacio es infinitamente grande, usted podría preguntarse qué significa decir que el universo es mayor ahora que

lo era en el pasado. La respuesta es que «mayor» se refiere a las distancias entre galaxias hoy comparadas con las distancias entre esas mismas galaxias en el pasado. La expansión del universo significa que las galaxias están ahora más separadas, lo que se refleja matemáticamente en que el factor de escala del universo se hace mayor. En el caso de un universo infinito, «mayor» no se refiere al tamaño total del espacio, puesto que una vez infinito es siempre infinito. Pero por comodidad de lenguaje, seguiré refiriéndome al tamaño cambiante del universo, incluso en el caso de un espacio infinito, en el bien entendido de que me estoy refiriendo a las distancias cambiantes entre galaxias. <<

[86] Para el lector con inclinación matemática, he aquí cómo se hace el cálculo de la distancia —ahora, en el instante t_{ahora}— que ha viajado la luz desde que fue emitida en el instante t_{emitida}. Trabajaremos en el contexto de un ejemplo en el que la parte espacial del espacio-tiempo es plana, de modo que la métrica puede escribirse como $\mathrm{d}s^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - a^2(t)\mathrm{d}x^2$, donde $a(t)$ es el factor de escala del universo en el instante t, y c es la velocidad de la luz. Las coordenadas que estamos utilizando se llaman coordenadas *comóviles*. En el lenguaje desarrollado en este capítulo, puede pensarse que tales coordenadas etiquetan puntos en el mapa estático; el factor de escala suministra la información contenida en la leyenda del mapa.

La característica especial de la trayectoria seguida por la luz es que $\mathrm{d}s^2 = 0$ (equivalente a que la velocidad de la luz sea siempre c) a lo largo de la trayectoria, lo que implica que $|dx| = \frac{cdt}{a(t)}$, o, durante un intervalo de tiempo finito tal como el que hay entre t_{emitida} y t_{ahora} : $\int |dx| = \int_{t_{emitida}}^{t_{ahora}} \frac{cdt}{a(t)}$. El primer miembro de esta ecuación da la distancia que viaja la luz a través del mapa estático entre emisión y ahora. Para convertirla en

la distancia a través del espacio real, debemos reescalar la fórmula por el factor de escala de hoy; por consiguiente, la distancia total que recorrió la luz es igual a $a(t_{ahora}) = \int_{t_{emitida}}^{t_{ahora}} \frac{cdt}{a(t)}$. Si el espacio no se estuviera estirando, la distancia total recorrida sería $\int_{t_{emitida}}^{t_{ahora}} cdt = c(t_{ahora} - t_{emitida})$, como era de esperar. Al calcular la distancia recorrida en un universo en expansión, vemos que cada segmento de la trayectoria de la luz se multiplica por el factor $\frac{a(t_{ahora})}{a(t)}$, que es la cantidad en que se ha estirado dicho segmento, desde el momento en que lo atravesó la luz hasta hoy. <<

[87] Más exactamente, unos $7{,}12 \times 10^{-30}$ gramos por centímetro cúbico. <<

[88] La conversión es $7{,}12 \times 10^{-30}$ gramos/centímetro cúbico = ($7{,}12 \times 10^{-30}$ gramos/centímetro cúbico) × ($4{,}6 \times 10^{4}$ masas de Planck/gramo) × ($1{,}62 \times 10^{-33}$ centímetros/longitud de Planck)^{3} = $1{,}38 \times 10^{-123}$ masas de Planck/volumen de Planck cúbico. <<

[89] En el caso de la inflación, la gravedad repulsiva que considerábamos era intensa y breve. Esto se explica por las enormes energía y presión negativa suministradas por el campo inflatón. Sin embargo, modificando la curva de energía potencial de un campo inflatón puede reducirse la cantidad de energía y presión negativa que suministra, lo que da lugar a una expansión moderadamente acelerada. Adicionalmente, un ajuste adecuado de la curva de energía potencial puede prolongar este período de expansión acelerada. Un período moderado y prolongado de expansión acelerada es lo que se requiere para explicar los datos de supernovas. Sin embargo, el pequeño valor no nulo para la constante cosmológica sigue siendo la explicación más convincente que ha surgido en los más de diez años transcurri-

dos desde que se observó por primera vez la expansión acelerada. <<

[90] El lector con inclinación matemática debería advertir que cada una de estas fluctuaciones aporta una energía que es inversamente proporcional a su longitud de onda, lo que asegura que la suma sobre todas las longitudes de onda posibles da una energía infinita. <<

[91] Para el lector con inclinación matemática, la anulación ocurre porque la supersimetría empareja bosones (partículas con un valor de espín entero) y fermiones (partículas con valor de espín semientero). Esto da como resultado que los bosones se describen por variables que conmutan, los fermiones por variables que anticonmutan, y ésa es la fuente del signo menos relativo en sus fluctuaciones cuánticas. <<

[92] El astrofísico de Cambridge, George Efstathiou, también fue uno de los pioneros que argumentó poderosa y convincentemente a favor de una constante cosmológica no nula. <<

[93] En el capítulo 7 examinaremos con más detalle los problemas de poner a prueba teorías que implican un multiverso; también analizaremos más de cerca el papel del razonamiento antrópico en dar resultados potencialmente comprobables. <<

[94] Aunque la afirmación de que cambios en las características físicas de nuestro universo serían inhóspitos para la vida tal como la conocemos es ampliamente aceptada en la comunidad científica, algunos han sugerido que el rango de características compatibles con la vida podría ser mayor que lo que se pensaba antes. Se ha escrito mucho sobre estas cuestiones. Véase, por ejemplo, John Barrow y Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (New York, Oxford University Press, 1986); John Barrow, *The Constants of Nature* (New York, Pantheon Books, 2003); Paul Davies, *The Cosmic Jackpot* (New York, Houghton Mifflin Harcourt, 2007); Victor Stenger, *Has Science Found God?*

(Amherst, Nueva York, Prometheus Books, 2003), y las referencias incluidas en ellos. <<

[95] El autor hace aquí un juego de palabras: Harvey Weinstein fue uno de los productores de *Pulp Fiction. (N. del t.)* <<

[96] Basado en el material cubierto en capítulos anteriores, usted podría pensar inmediatamente que la respuesta es un sí categórico. Consideremos, dice usted, el multiverso mosaico, cuya extensión espacial infinita contiene infinitos universos. Pero usted tiene que ser cuidadoso. Incluso con infinitos universos, la lista de diferentes constantes cosmológicas representadas podría no ser larga. Si, por ejemplo, las leyes subyacentes no permiten muchos valores diferentes de la constante cosmológica, entonces, independientemente del número de universos, sólo se realizaría la pequeña colección de constantes cosmológicas posibles. Así, la pregunta que estamos planteando es si (a) hay candidatos a leyes de la física que dan lugar a un multiverso, (b) el multiverso así generado contiene mucho más de 10^{124} universos diferentes, y (c) las leyes garantizan que el valor de la constante cosmológica varía de un universo a otro. <<

[97] Estos cuatro autores fueron los primeros en demostrar por completo que mediante elecciones juiciosas de formas de Calabi-Yau, y de los flujos que atraviesan sus agujeros, ellos podrían realizar modelos de cuerdas con constantes cosmológicas pequeñas y positivas, como los encontrados por las observaciones. Junto con Juan Maldacena y Liam McAllister, este grupo escribió posteriormente un artículo muy influyente sobre cómo combinar la cosmología inflacionaria con la teoría de cuerdas. <<

[98] Más exactamente, este terreno montañoso ocuparía un espacio aproximadamente 500-dimensional, cuyas direcciones independientes —ejes— corresponderían a diferentes flujos de campo. La Figura 6.4 es una tosca representación, pero da una

idea de las relaciones entre las diversas formas para las dimensiones extra. Adicionalmente, cuando hablan del paisaje de cuerdas, los físicos imaginan generalmente que el terreno montañoso engloba, además de los valores posibles del flujo, todos los posibles tamaños y formas (las diferentes topologías y geometrías) de las dimensiones extra. Los valles en el paisaje de cuerdas son localizaciones (formas específicas para las dimensiones extra y los flujos que transportan) donde se asienta de forma natural un universo burbuja, igual que una bola se asentaría en un punto similar en un terreno montañoso real. Cuando se describen matemáticamente, los valles son mínimos (locales) de la energía potencial asociados con las dimensiones extra. Clásicamente, una vez que un universo burbuja adquiriera una forma dimensional extra correspondiente a un valle, esa característica no cambiaría nunca. Mecano-cuánticamente, sin embargo, veremos que sucesos de efecto túnel pueden hacer que cambie la forma de las dimensiones extra. <<

[99] El protagonista de la novela *Cuna de gato*, de Kurt Vonnegut, ha obtenido una variedad de hielo, el hielo-nueve, que se mantiene sólido a temperatura ambiente. El agua líquida en contacto con una minúscula «semilla» de hielo-nueve se transforma inmediatamente en hielo. *(N. del t.)* <<

[100] El efecto túnel cuántico a un pico más alto es posible, pero sustancialmente menos probable según los cálculos cuánticos. <<

[101] La duración de la expansión de la burbuja previa a la colisión determina el impacto del choque siguiente, y la interrupción que ello conlleva. Tales colisiones plantean también un punto interesante que tiene que ver con el tiempo, que recuerda el ejemplo con Trixie y Norton en el capítulo 3. Cuando colisionan dos burbujas, sus bordes exteriores —donde la energía del campo inflatón es alta— entran en contacto. Desde la perspectiva de alguien dentro de una cualquiera de las burbujas

que colisionan, un alto valor de la energía del inflatón corresponde a momentos tempranos en el tiempo, cerca del big bang de la burbuja. Y así, colisiones de burbujas suceden en el nacimiento de cada universo, que es la razón por la que los rizos creados pueden afectar a otro proceso del universo primitivo, la formación de la radiación de fondo de microondas. <<

[102] Abordaremos la mecánica cuántica de forma más sistemática en el capítulo 8. Como veremos allí, la afirmación que he hecho, «se escurren fuera de la arena de la realidad cotidiana» puede interpretarse en varios niveles. La interpretación que tengo aquí en mente es la conceptualmente más simple: la ecuación de la mecánica cuántica supone que las ondas de probabilidad no habitan en general en las dimensiones espaciales de la experiencia común. En su lugar, las ondas residen en un ambiente diferente que tiene en cuenta no sólo las dimensiones espaciales cotidianas, sino también el *número* de partículas que se están describiendo. Se llama *espacio de configuración*, y para el lector con inclinación matemática se explica en la nota 4 del capítulo 8. <<

[103] Puesto que hay perspectivas diferentes con respecto al papel de la teoría científica en pos de una comprensión de la naturaleza, las observaciones que estoy haciendo están sujetas a diversas interpretaciones. Dos posiciones prominentes son los *realistas*, quienes mantienen que las teorías matemáticas pueden proporcionar ideas directas sobre la naturaleza de la realidad, y los *instrumentalistas*, quienes creen que la teoría proporciona un medio para predecir lo que deberían registrar nuestros aparatos de medida, pero no nos dice nada sobre una realidad subyacente. Tras décadas de argumentación rigurosa, los filósofos de la ciencia han elaborado numerosos refinamientos de estas posiciones y otras relacionadas. Como sin duda está claro, mi perspectiva, y el enfoque que adopto en este libro, está decididamente en el campo realista. Este capítulo en particular, don-

de se examina la validez científica de ciertos tipos de teorías, y se valora lo que dichas teorías podrían implicar para la naturaleza de la realidad, es uno en el que diversas orientaciones filosóficas enfocarían el tema con diferencias considerables. <<

[104] Si la expansión acelerada del espacio que hemos observado no es permanente, entonces en algún momento en el futuro la expansión del espacio se frenará. El frenado permitiría que la luz procedente de objetos que están ahora más allá de nuestro horizonte cósmico nos alcance; nuestro horizonte cósmico crecería. Entonces sería aún más peculiar sugerir que dominios que ahora están más allá de nuestro horizonte no son reales, puesto que en el futuro tendríamos acceso a esos mismos dominios. (Usted recordará que hacia el final del capítulo 2 yo advertí que el horizonte cósmico ilustrado en la Figura 2.2 crecerá conforme pase el tiempo. Eso es cierto en un universo en el que el ritmo de la expansión espacial no se está acelerando. Sin embargo, si la expansión se está acelerando, hay una distancia más allá de la cual no podemos ver nunca, por mucho que esperemos. En un universo en aceleración, los horizontes cósmicos no pueden hacerse mayores que un tamaño determinado matemáticamente por el ritmo de la aceleración). <<

[105] En un multiverso que contenga un número enorme de universos diferentes, una preocupación razonable es que, independientemente de lo que revelen las observaciones y los experimentos, hay algún universo en la enorme colección de la teoría que es compatible con los resultados. Si es así, no habría evidencia experimental que pudiera probar que la teoría es falsa; a su vez, ningún dato podría ser propiamente interpretado como prueba en apoyo de la teoría. Pronto consideraré esta cuestión. <<

[106] He aquí un ejemplo concreto de una característica que puede ser común a todos los universos en un multiverso particular. En el capítulo 2 señalamos que los datos actuales apun-

tan con fuerza a que la curvatura del espacio sea cero. Pero, por razones que son matemáticamente técnicas, los cálculos establecen que todos los universos burbuja en el multiverso inflacionario tienen curvatura negativa. Dicho en términos muy generales, la formas espaciales barridas por valores iguales del inflatón —formas determinadas al conectar valores iguales en la Figura 3.8b— son más parecidas a patatas *chips* que a tableros de mesa planos. Incluso así, el multiverso inflacionario sigue siendo compatible con la observación, puesto que cuando una forma cualquiera se expande, su curvatura decrece; la curvatura de una canica es obvia, mientras que la de la superficie terrestre pasó desapercibida durante milenios. Si nuestro universo burbuja ha sufrido expansión suficiente, su curvatura podría ser negativa, pero tan pequeña que las medidas de hoy no puedan distinguirla de cero. Eso da lugar a un test potencial. Si observaciones futuras más precisas determinaran que la curvatura del espacio es muy pequeña pero *positiva*, eso proporcionaría una prueba en contra de que seamos parte de un multiverso inflacionario, como han argumentado B. Freivogel, M. Kleban, M. Rodríguez Martínez y L. Susskind (véase «Observational Consequences of a Landscape», *Journal of High Energy Physics* 0603, 039 [2006]). Una medida de curvatura positiva de una parte en 10^5 sería un fuerte argumento en contra del tipo de transiciones por efecto túnel cuántico (capítulo 6) ideado para poblar el paisaje de cuerdas. <<

[107] Entre los muchos cosmólogos y teóricos de cuerdas que han hecho avanzar este tema se incluyen Alan Guth, Andrei Linde, Alexander Vilenkin, Jaume Garriga, Don Page, Sergei Winitzki, Richard Easther, Eugene Lim, Matthew Martin, Michael Douglas, Frederik Denef, Raphael Bousso, Ben Freivogel, I-Sheng Yang, Delia Schwartz-Perlov y muchos otros. <<

[108] Una reserva importante es que aunque el impacto que tienen cambios modestos en unas pocas constantes puede de-

ducirse con fiabilidad, cambios más importantes en un gran número de constantes hacen la tarea mucho más difícil. Al menos es posible que tales cambios importantes en una variedad de constantes de la naturaleza anulen mutuamente sus efectos, o se combinen de nuevas maneras, y sean entonces compatibles con la vida tal como la conocemos. <<

[109] De forma algo más precisa, si la constante cosmológica es negativa, pero suficientemente pequeña, el tiempo de colapso sería suficientemente largo para permitir la formación de galaxias. Por comodidad, estoy obviando esta sutileza. <<

[110] Otro punto digno de mención es que los cálculos que he descrito fueron emprendidos sin hacer una elección específica para el multiverso. En su lugar, Weinberg y sus colaboradores procedieron postulando un multiverso en el que las características podían variar y calcularon la abundancia de galaxias en cada uno de sus universos constituyentes. Cuantas más galaxias tuviera un universo, más peso daban Weinberg y sus colaboradores a sus propiedades en su cálculo de las características promedio que encontraría un observador típico. Pero puesto que ellos no se comprometían con una teoría de multiverso subyacente, los cálculos necesariamente dejaban de tener en cuenta la probabilidad de que un universo con esta o esa propiedad se encontrara realmente en el multiverso (es decir, las probabilidades que hemos discutido en la sección previa). Universos con constantes cosmológicas y fluctuaciones primordiales en ciertos rangos podrían estar maduros para la formación de galaxias, pero si tales universos se crean raramente en un multiverso dado, sería en cualquier caso muy poco probable que nosotros nos encontremos en uno de ellos.

Para hacer tratables los cálculos, Weinberg y sus colaboradores argumentaron que puesto que el rango de valores de la constante cosmológica que estaban considerando era muy estrecho (entre 0 y del orden de 10^{-120}), no cabía esperar que las

probabilidades intrínsecas de que existieran tales universos en un multiverso dado variaran enormemente, igual que tampoco pueden diferir sustancialmente las probabilidades de que usted encontrara un perro de 29,99997 kilogramos o uno de 29,99999 kilogramos. Así pues, ellos supusieron que cada valor de la constante cosmológica en el pequeño rango compatible con la formación de galaxias es tan intrínsecamente probable como cualquier otro. Con nuestra comprensión rudimentaria de la formación del multiverso, esto podría parecer un primer paso razonable. Pero un trabajo posterior ha cuestionado la validez de esta hipótesis y ha insistido en que un cálculo completo debe ir más allá: debe comprometerse con una propuesta de multiverso definida y determinar la distribución real de universos con diversas propiedades. Un cálculo antrópico autoconsistente que se base en un mínimo de hipótesis es la única manera de juzgar si esta aproximación dará finalmente un fruto explicatorio. <<

[111] El mismo significado de «típico» también está cargado, pues depende de cómo se defina y mida. Si utilizamos números de niños y automóviles como indicador, llegamos a una especie de familia americana «típica». Si utilizamos escalas diferentes tales como el interés por la física, la afición a la ópera o la participación en política, la caracterización de una familia «típica» cambiará. Y lo que es cierto para la familia americana «típica» es cierto probablemente para observadores «típicos» en el multiverso: la consideración de características más allá del mero tamaño de la población daría una noción diferente de quién es «típico». A su vez, esto afectaría a las predicciones de cuán probable es que veamos esta o esa propiedad en nuestro universo. Para que un cálculo antrópico sea verdaderamente convincente, tendría que abordar esta cuestión. Alternativamente, como se indica en el texto, las distribuciones tendrían que tener unos pi-

cos tan estrechos que habría una mínima variación de un universo que soporta vida a otro. <<

[112] Popular programa-concurso de la televisión norteamericana en la que el concursante debe optar por aceptar unos premios o cambiarlos por otros que le ofrece el presentador. Durante muchos años el presentador fue Monty Hall. En el mundo de habla hispana se hicieron algunas versiones con el título *Trato hecho*. *(N. del t.)* <<

[113] El estudio matemático de conjuntos con un número infinito de miembros es rico y bien desarrollado. El lector con inclinación matemática quizá esté familiarizado con el hecho de que la investigación, que se remonta al siglo XIX, estableció que hay diferentes «tamaños» o, más usualmente, «niveles» de infinito. Es decir, una cantidad infinita puede ser mayor que otra. El nivel de infinito que da el tamaño del conjunto que contiene todos los números enteros se denomina $\aleph_0$. George Cantor demostró que este nivel de infinito es menor que el que da el número de miembros contenidos en el conjunto de los números reales. Hablando en términos muy generales, si usted trata de emparejar números enteros con números reales, necesariamente agota los primeros antes que los últimos. Y si usted considera el conjunto de todos los subconjuntos de los números reales, el nivel de infinito se hace aún mayor.

Ahora bien, en todos los ejemplos que discutimos en el texto principal, el infinito relevante es $\aleph_0$, puesto que estamos tratando con colecciones infinitas de objetos discretos, o «numerables» —es decir, diversas colecciones de números enteros—. Así, en el sentido matemático todos estos ejemplos tienen el mismo tamaño; el número de miembros se describe por el mismo nivel de infinito. Sin embargo, para la física, como pronto veremos, una conclusión como ésta no sería especialmente útil. En su lugar, el objetivo es encontrar un esquema físicamente motivado para comparar colecciones infinitas de universos que

diera una jerarquía más refinada y que refleje la abundancia relativa en el multiverso de un conjunto de características físicas comparado con otro. Una típica aproximación física a un problema de este tipo consiste en hacer primero comparaciones entre subconjuntos finitos de colecciones infinitas relevantes (puesto que en el caso finito, todas las cuestiones enigmáticas se evaporan), y luego permitir que los subconjuntos incluyan cada vez más miembros, hasta englobar finalmente las colecciones infinitas completas. El obstáculo está en encontrar una manera físicamente justificable de escoger los subconjuntos finitos para comparar, y luego establecer también qué comparaciones siguen siendo razonables a medida que los subconjuntos se hacen más grandes. <<

[114] A la inflación se le atribuyen también otros éxitos, incluida la solución al *problema de los monopolos magnéticos*. En los intentos de unir las tres fuerzas no gravitatorias en una estructura teórica unificada (conocida como *gran unificación*), los investigadores encontraron que las matemáticas resultantes implicaban que inmediatamente después del big bang se deberían haber formado muchísimos monopolos magnéticos. Estas partículas serían, en efecto, el polo norte de un imán sin el habitual polo sur emparejado (o viceversa). Pero nunca se han encontrado tales partículas. La cosmología inflacionaria explica la ausencia de monopolos apuntando que la breve pero extraordinaria expansión del espacio inmediatamente después del big bang habría diluido su presencia en nuestro universo hasta prácticamente cero. <<

[115] Actualmente, hay diferentes opiniones sobre la magnitud del desafío que esto presenta. Algunos ven el problema de la medida como una peliaguda cuestión técnica que, una vez resuelta, proporcionará a la cosmología inflacionaria un importante detalle adicional. Otros (por ejemplo, Paul Steinhardt) han expresado la creencia de que resolver el problema de la

medida requerirá alejarse tanto de la formulación matemática de la cosmología inflacionaria que el marco resultante tendrá que interpretarse como una teoría cosmológica completamente nueva. Mi opinión, que comparte un número pequeño pero creciente de investigadores, es que el problema de la medida está tocando un problema profundo en la raíz misma de la física, un problema que quizá requiera una revisión sustancial de las ideas fundacionales. <<

[116] Tanto la tesis original de Everett de 1956 como la versión abreviada de 1957 pueden encontrarse en *The Many-World Interpretation of Quantum Mechanics*, editado por Bryce S. DeWitt y Neill Graham (Princeton, Princeton University Press, 1973). <<

[117] El 27 de enero de 1998 tuve una conversación con John Wheeler para discutir algunos aspectos de la mecánica cuántica y la relatividad general sobre los que iba a escribir en *El universo elegante*. Antes de entrar en la ciencia propiamente dicha, Wheeler señaló lo importante que era, especialmente para los teóricos jóvenes, encontrar el lenguaje correcto para expresar sus resultados. En ese momento lo tomé como un mero consejo sabio, quizá inspirado por su charla conmigo, un «joven teórico», que había mostrado interés en utilizar el lenguaje ordinario para describir ideas matemáticas. Al leer la iluminadora historia narrada en *The Many Worlds of Hugh Everett III*, de Peter Byrne (New York, Oxford University Press, 2010), me chocó el énfasis de Wheeler en el mismo tema unos cuarenta años antes en su trato con Everett, pero en un contexto en donde había mucho más en juego. En respuesta al primer borrador que hizo Everett de su tesis, Wheeler le dijo que tenía que «depurar las palabras, no el formalismo», y le advirtió de «la dificultad de expresar en palabras cotidianas los entresijos de un esquema matemático que está lo más lejos posible de la descripción cotidiana; las contradicciones y los malentendidos que surgirán; la car-

ga muy pesada y la responsabilidad que uno tiene de afirmar todo de tal manera que estos malentendidos no puedan aparecer». Byrne presenta un argumento convincente según el cual Wheeler estaba caminando en una línea delicada entre su admiración por el trabajo de Everett y su respeto por el marco mecano-cuántico que Bohr y muchos otros físicos renombrados se habían esforzado en construir. Por una parte, él no quería que las ideas de Everett fueran desechadas sumariamente por la vieja guardia porque la presentación se estimara exagerada, o debido a palabras con una fuerte carga (como universos que se «desdoblan») que podrían parecer descabelladas. Por otra parte, Wheeler no quería que la comunidad establecida de los físicos concluyera que él estaba abandonando el formalismo cuántico que se había mostrado acertado y encabezaba un asalto injustificado. El compromiso que Wheeler estaba imponiendo sobre Everett y su tesis doctoral era mantener las matemáticas que él había desarrollado pero formular su significado y utilidad en un tono más suave y conciliador. Al mismo tiempo, Wheeler animaba con fuerza a Everett a visitar a Bohr y presentar su argumento en persona, en una pizarra. Eso es precisamente lo que hizo Everett en 1959, pero lo que él pensaba que sería una discusión de dos semanas se redujo a unas pocas conversaciones improductivas. Nadie cambió de opinión; nadie alteró su posición. <<

[118] Permítame clarificar una imprecisión. La ecuación de Schrödinger muestra que los valores alcanzados por una onda cuántica (o, en el lenguaje del campo, la función de onda) pueden ser positivos o negativos; con más generalidad, los valores pueden ser números complejos. Tales valores no pueden presentarse directamente como probabilidades, ¿qué sentido tendría una probabilidad negativa o compleja? Más bien, las probabilidades están asociadas con *el cuadrado de la magnitud* de la onda cuántica en una localización dada. Matemáticamente esto

significa que para determinar la probabilidad de encontrar una partícula en una localización dada, tomamos *el producto del valor de la onda en dicho punto por su complejo conjugado*. Esta aclaración aborda también una importante cuestión relacionada. Las anulaciones entre ondas que se solapan son vitales para crear un patrón de interferencia. Pero si las propias ondas fueran descritas adecuadamente como ondas de probabilidad, tales anulaciones no podrían suceder porque las probabilidades son números positivos. Como vemos ahora, sin embargo, las ondas cuánticas no sólo tienen valores positivos; esto permite que tengan lugar anulaciones entre números positivos y negativos, y también, con más generalidad, entre números complejos. Puesto que sólo necesitaremos características cualitativas de tales ondas, para facilitar la discusión en el texto principal no distinguiré entre una onda cuántica y la onda de probabilidad asociada (derivada de su magnitud al cuadrado). <<

[119] Para el lector con inclinación matemática, nótese que la onda cuántica (función de onda) para una única partícula con gran masa se conformaría a la descripción que he dado en el texto. Sin embargo, los objetos muy masivos están generalmente compuestos de muchas partículas, no de una. En tal situación, la descripción mecano-cuántica es más complicada. En particular, usted podría haber pensado que todas las partículas podrían describirse por una onda cuántica definida en la misma malla de coordenadas que empleamos para una sola partícula —utilizando los mismos tres ejes espaciales—. Pero eso no es correcto. La onda de probabilidad toma como dato de entrada la *posición posible* de cada partícula y produce la probabilidad de que las partículas ocupen dichas posiciones. En consecuencia, la onda de probabilidad vive en un espacio con tres ejes por cada partícula; es decir, hay en total tres veces tantos ejes como partículas (o diez veces, si usted acepta las dimensiones espaciales extra de la teoría de cuerdas). Esto significa que la función

de onda para un sistema compuesto hecho de n partículas fundamentales es una función de valor complejo cuyo dominio no es el espacio tridimensional ordinario, sino más bien un espacio $3n$-dimensional; si el número de dimensiones espaciales no es 3 sino más bien m, el número 3 en estas expresiones se reemplazaría por m. Este espacio se denomina *espacio de configuración*. Es decir, en el escenario general, la función de onda sería una aplicación $\psi: \Re^{mn} \rightarrow C$. Cuando hablamos de que dicha función de onda tiene un pico estrecho, queremos decir que esta aplicación tendría soporte en una pequeña bola mn-dimensional dentro de su dominio. Nótese, en particular, que las funciones de onda no residen generalmente en las dimensiones espaciales de la experiencia común. Sólo en el caso idealizado de la función de onda para una única partícula completamente aislada, su espacio de configuración coincide con el entorno espacial familiar. Nótese también que cuando yo digo que las leyes cuánticas muestran que la función de onda con un pico estrecho para un objeto masivo sigue la misma trayectoria que implican las ecuaciones de Newton para el propio objeto, usted puede pensar que la función de onda describe el movimiento del centro de masas del objeto. <<

[120] Por simplicidad, no consideraremos la posición del electrón en la dirección vertical —nos fijamos solamente en su posición en un mapa de Manhattan—. Además, déjeme volver a resaltar que aunque esta sección dejará claro que la ecuación de Schrödinger no permite que las ondas sufran un colapso instantáneo como en la Figura 8.6, las ondas *pueden* ser preparadas cuidadosamente por el experimentador con una forma puntiaguda (o, más exactamente, muy próxima a una forma puntiaguda). <<

[121] A partir de esta descripción, usted podría concluir que hay infinitos lugares en donde podría encontrarse el electrón: para llenar adecuadamente la onda cuántica que varía gradual-

mente, usted necesitaría un número infinito de ondas puntiagudas, cada una de ellas asociada con una posible posición del electrón. ¿Cómo se relaciona esto con el capítulo 2, en el que discutíamos la existencia de un número finito de configuraciones distintas para las partículas? Para evitar matizaciones constantes que serían de mínima relevancia para las cuestiones importantes que estoy explicando en este capítulo, no he resaltado el hecho, que encontramos en el capítulo 2, de que para fijar la localización del electrón con precisión cada vez mayor su aparato tendría que ejercer una energía cada vez mayor. Puesto que las situaciones físicamente realistas sólo tienen acceso a una energía finita, la resolución es imperfecta. Para ondas cuánticas puntiagudas, esto significa que en cualquier contexto de energía finita los picos tienen una anchura no nula. A su vez, esto implica que en cualquier dominio acotado (tal como un horizonte cósmico) el número de localizaciones del electrón que pueden distinguir las medidas es finito. Además, cuanto más estrechos son los picos (cuanto más fina es la resolución de la posición de la partícula) más anchas son las ondas cuánticas que describen la energía de la partícula, lo que ilustra el compromiso obligado por el principio de incertidumbre. <<

[122] Para el lector con inclinación filosófica, señalaré que la historia de dos niveles para la explicación científica ha sido tema de debate filosófico. Para ideas y discusiones relacionadas véase Frederick Suppe, *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism* (Chicago, University of Illinois Press, 1989); James Ladyman, Don Ross, David Spurret y John Collier, *Ever Thing Must Go* (Oxford, Oxford University Press, 2007). <<

[123] Para una representación matemática, véase la nota 4. <<

[124] Los físicos suelen hablar vagamente de la existencia de infinitos universos asociados con la aproximación de los muchos mundos a la mecánica cuántica. Ciertamente, hay infinitas formas posibles de ondas de probabilidad. Incluso en una única

localización en el espacio usted puede variar continuamente el valor de una onda de probabilidad, y por ello dicha onda puede tener infinitos valores diferentes. Sin embargo, las ondas de probabilidad no son el atributo físico de un sistema al que tengamos acceso directo. En su lugar, las ondas de probabilidad contienen información sobre los posibles resultados distintos en una situación dada, y éstos no tienen por qué tener una variedad infinita. Específicamente, el lector con inclinación matemática advertirá que una onda cuántica (una función de onda) reside en un espacio de Hilbert. Si dicho espacio de Hilbert es de dimensión finita, entonces hay finitos resultados posibles distintos para medidas en el sistema físico descrito por dicha función de onda (es decir, cualquier operador hermítico tiene un número finito de valores propios distintos). Esto entrañaría un número finito de mundos para un número finito de observaciones o medidas. Se cree que el espacio de Hilbert asociado con la física que tiene lugar dentro de cualquier volumen finito de espacio, y limitada a tener una cantidad de energía finita, es necesariamente de dimensión finita (un punto que abordaremos con más generalidad en el capítulo 9), lo que sugiere que el número de universos sería análogamente finito. <<

[125] Véase Peter Byrne, *The Many Worlds of Hugh Everett III* (New York, Oxford University Press, 2010), p. 177. <<

[126] Esta perspectiva sin azar sería un sólido argumento para abandonar la terminología coloquial que he utilizado, «onda de probabilidad», a favor del nombre técnico, «función de onda». <<

[127] Durante años, varios investigadores, entre los que se incluyen Neill Graham, Bryce DeWitt, James Hartle, Edward Farhi, Jeffrey Goldstone y Sam Gutmann; David Deutsch; Sidney Coleman; David Albert; y otros, entre los que me incluyo, han llegado independientemente a un hecho matemáticamente sorprendente que parece central para entender la naturaleza de

la probabilidad en mecánica cuántica. Para el lector con inclinación matemática, esto es lo que dice: sea $|\psi\rangle$ la función de onda para un sistema mecanocuántico, un vector que es un elemento del espacio de Hilbert *H*. La función de onda para *n* copias idénticas del sistema es entonces $|\psi\rangle^{\otimes n}$. Sea *A* un operador hermítico con valores propios α_k, y funciones propias $|\lambda_k\rangle$. Sea $F_k(A)$ el operador «frecuencia» que cuenta el número de veces que $|\lambda_k\rangle$ aparece en un estado dado que yace en $H^{\otimes n}$. El resultado matemático es que $\lim_{n\to\infty}[F_k(A)\ |\psi\rangle^{\otimes n}] = |\langle\psi|\lambda_k\rangle|^2|\psi\rangle^{\otimes n}$. Es decir, cuando el número de copias idénticas del sistema crece sin límite, la función de onda del sistema compuesto se aproxima a una función de onda del operador frecuencia, con valor propio $|\langle\psi|\lambda_k\rangle|^2$. Éste es un resultado notable. Ser una función propia del operador frecuencia significa que, en el límite establecido, la fracción de veces que un observador que mida *A* encontrará α_k es $|\langle\psi|\lambda_k\rangle|^2$ —lo que parece la derivación más directa de la famosa regla de Born para la probabilidad mecano-cuántica—. Desde la perspectiva de los muchos mundos, sugiere que aquellos mundos en los que la fracción de veces que se observa α_k no concuerda con la regla de Born tiene norma cero en el espacio de Hilbert en el límite de *n* arbitrariamente grande. En este sentido, parece como si la probabilidad mecano-cuántica tuviera una interpretación directa en la aproximación de muchos mundos. Todos los observadores en los muchos mundos verán resultados con frecuencias que coinciden con las de la mecánica cuántica estándar, excepto para un conjunto de observadores cuya norma en el espacio de Hilbert tiende a cero cuando *n* tiende a infinito. Por prometedor que esto parezca, cuando se reflexiona un poco resulta menos convincente. ¿En qué sentido podemos decir que un observador con una norma pequeña en el espacio de Hilbert, o una norma que tiende a cero cuando *n* tiende a infinito, es poco importante o no existe? Queremos decir que tales observadores son

anómalos o «improbables», pero ¿cómo trazamos un vínculo entre la norma de un vector en el espacio de Hilbert y estas caracterizaciones? Un ejemplo hace manifiesta la cuestión. En un espacio de Hilbert bidimensional, digamos con estados espín-arriba $|\uparrow\rangle$ y espín-abajo $|\downarrow\rangle$, consideremos un estado $|\psi\rangle = 0{,}99\,|\uparrow\rangle + 0{,}14\,|\downarrow\rangle$. Este estado da una probabilidad de aproximadamente 0,98 para medir espín-arriba y aproximadamente 0,02 para medir espín-abajo. Si consideramos n copias de este sistema de espín, $|\psi\rangle^{\otimes n}$, entonces, cuando n tiende a infinito, la inmensa mayoría de términos en la expansión de este vector tiene aproximadamente igual número de estados espín-arriba y espín-abajo. Por ello, desde el punto de vista de observadores (copias del experimentador), la inmensa mayoría vería espín-arriba y espín-abajo en una proporción que no concuerda con las predicciones mecano-cuánticas. Sólo los poquísimos términos en la expansión de $|\psi\rangle^{\otimes n}$ que tienen 98 por 100 de espín-arriba y 2 por 100 de espín-abajo son compatibles con la expectativa mecano-cuántica; el resultado anterior nos dice que estos estados son los únicos con una norma en el espacio de Hilbert distinta de cero cuando n tiende a infinito. En cierto sentido, entonces, la inmensa mayoría de términos en la expansión de $|\psi\rangle^{\otimes n}$ (la inmensa mayoría de copias del experimentador) debe considerarse como «inexistente». El problema está en entender qué significa esto, si es que significa algo.

Yo también encontré de forma independiente el resultado matemático antes descrito mientras preparaba las lecciones de un curso de mecánica cuántica que estaba impartiendo. Fue excitante ver que la interpretación probabilista de la mecánica cuántica sale aparentemente de forma directa del formalismo matemático —imagino que la lista de físicos (en la p. 449) que encontraron este resultado antes que yo experimentaron lo mismo. Me sorprende lo poco conocido que es este resultado entre la generalidad de los físicos. Por ejemplo, no conozco

ningún libro de texto estándar de física cuántica que lo incluya. Mi impresión sobre el resultado es que se puede considerar como (1) una fuerte motivación matemática para la interpretación probabilista de Born para la función de onda —si Born no hubiera «conjeturado» esta interpretación, las matemáticas habrían llevado a alguien a ella eventualmente—; (2) una comprobación de consistencia de la interpretación probabilista —si *no* se sostuviera este resultado matemático, habría desafiado la sensibilidad interna de la interpretación probabilista de la función de onda—. <<

[128] He estado utilizando la frase «razonamiento de tipo zaxtariano» para denotar un marco en el que la probabilidad entra a través de la ignorancia de cada habitante de los muchos mundos acerca de en qué mundo concreto habita. Lev Vaidman ha sugerido que hay que tomar más en serio otros detalles del universo zaxtariano. Él argumenta que la probabilidad entra en la aproximación de los muchos mundos por la ventana temporal que va desde que un experimentador completa una medida hasta que lee el resultado. Pero, contraatacan los escépticos, esto es demasiado tarde: lo que incumbe a la mecánica cuántica, y a la ciencia con más generalidad, es hacer predicciones sobre lo que *sucederá* en un experimento, y no lo que *sucedió*. Y lo que es más, parece precario que la probabilidad cuántica descanse en lo que parece ser un retardo temporal evitable: parece que si un científico tiene acceso inmediato al resultado de su experimento, la probabilidad cuántica corre peligro de ser expulsada de la imagen. (Para una discusión detallada véase David Albert, «Probability in the Everett Picture» en *Many Worlds: Everett, Quantum Theory, and Reality*, eds. Simon Saunders, Jonathan Barret, Adrian Kent y David Wallace (Oxford, Oxford University Press, 2010) y «Uncertainty and Probability for Branching Selves», Peter Lewis, philsiarchive.pitt.edu/archive/00002636). Una última cuestión de relevancia para la sugerencia de Vaid-

man y también para este tipo de probabilidad basada en ignorancia es ésta: cuando lanzo una moneda limpia en el contexto familiar de un único universo, la razón por la que digo que hay un 50 por 100 de probabilidades de que la moneda caiga de cara es que, aunque yo experimentaré sólo un resultado, hay dos resultados que *podría* haber experimentado. Pero déjeme ahora cerrar los ojos e imaginar que acabo de medir la posición del electrón melancólico. Yo sé que la pantalla del detector dice o bien Strawberry Fields o bien tumba de Grant, pero no se cuál. Usted entonces me pregunta. «Brian», dice usted, «¿cuál es la probabilidad de que la pantalla diga tumba de Grant?». Para responder, pienso de nuevo en el lanzamiento de la moneda, y cuando estoy a punto de hacer el mismo razonamiento, dudo. «Hummm», pienso. «¿Realmente hay dos resultados que *yo* podría haber experimentado? El *único* detalle que me distingue a mí del otro Brian es la lectura en mi pantalla. Imaginar que mi pantalla podría haber devuelto una lectura diferente es imaginar que yo no soy yo. Es imaginar que yo soy el otro Brian». Por eso, incluso si no sé lo que dice mi pantalla, yo —*este tipo que habla ahora en mi cabeza*— no podría haber experimentado ningún otro resultado; eso sugiere que mi ignorancia no se presta a un pensamiento probabilista. <<

[129] Los científicos pretenden ser objetivos en sus juicios. Pero yo me siento cómodo admitiendo que, por su economía matemática y sus implicaciones de largo alcance para la realidad, desearía que la aproximación de los muchos mundos fuera correcta. Al mismo tiempo, mantengo un sano escepticismo alimentado por las dificultades de integrar la probabilidad en el marco, de modo que estoy totalmente abierto a líneas de ataque alternativas. Dos de éstas proporcionan buenos apoyos para la discusión en el texto. Una trata de desarrollar la aproximación de Copenhague incompleta para dar una teoría completa; la

otra puede verse como muchos mundos sin los muchos mundos.

La primera dirección, encabezada por Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, trata de dar sentido al esquema de Copenhague cambiando las matemáticas de Schrödinger de modo que permitan que las ondas de probabilidad colapsen. Esto es más fácil de decir que de hacer. Las matemáticas modificadas apenas deberían afectar a las ondas de probabilidad para objetos pequeños como átomos o partículas individuales, puesto que no queremos cambiar las descripciones satisfactorias de la teoría en este dominio. Pero las modificaciones deben actuar con creces cuando entra en juego un objeto grande como un aparato de laboratorio, lo que hace que colapse la onda de probabilidad entrelazada. Ghirardi, Rimini y Weber desarrollaron matemáticas que llevan precisamente a eso. El resultado es que, con sus ecuaciones modificadas, el acto de medir hace que una onda de probabilidad colapse; pone en movimiento la evolución representada en la Figura 8.6.

La segunda aproximación, desarrollada inicialmente por el príncipe Louis de Broglie ya en los años veinte del siglo pasado, y más en detalle décadas más tarde por David Bohm, parte de una premisa matemática que resuena con Everett. La ecuación de Schrödinger debería gobernar siempre, en cualquier circunstancia, la evolución de las ondas cuánticas. Por ello, en la teoría de Broglie-Bohm las ondas de probabilidad evolucionan igual que lo hacen en la aproximación de los muchos mundos. Sin embargo, la teoría de de Broglie-Bohm pasa a proponer la misma idea que antes resalté como una idea mal encaminada: en la aproximación de de Broglie-Bohm, todos salvo uno de los muchos mundos encapsulados en una onda de probabilidad son meramente mundos posibles; sólo un mundo se distingue como real.

Para conseguirlo, la aproximación descarta el haiku cuántico tradicional de onda *o* partícula (un electrón es una onda hasta que se mide, a partir de lo cual vuelve a ser una partícula), y en su lugar defiende una imagen que engloba ondas y partículas. Contrariamente a la visión cuántica estándar, de Broglie y Bohm conciben las partículas como entidades minúsculas y localizadas que viajan a lo largo de trayectorias definidas, lo que da una realidad ordinaria e inequívoca, igual que en la tradición clásica. El único mundo «real» es aquel en que las partículas habitan sus posiciones únicas y definidas. Las ondas cuánticas desempeñan entonces un papel muy diferente. Más que incorporar una multitud de realidades, una onda cuántica actúa para *guiar el movimiento de las partículas*. La onda cuántica empuja a las partículas hacia lugares donde la onda es grande, lo que hace probable que las partículas se encuentren en tales lugares, y las aleja de lugares donde la onda es pequeña, lo que hace improbable que las partículas se encuentren en ellos. Para explicar el proceso, de Broglie y Bohm necesitaban una ecuación adicional que describe el efecto de una onda cuántica sobre una partícula, de modo que en su aproximación la ecuación de Schrödinger, aunque no suplantada, comparte el escenario con otro actor matemático. (El lector con inclinación matemática puede ver estas ecuaciones más abajo).

Durante muchos años era habitual oír que la aproximación de de Broglie-Bohm no era digna de consideración, cargada como estaba con un equipaje innecesario —no sólo una segunda ecuación, sino también, puesto que incluye partículas y ondas, una lista de ingredientes doblemente larga—. Más recientemente ha habido un reconocimiento creciente de que hay que contextualizar estas críticas. Como hace explícito el trabajo de Ghirardi-Rimini-Weber, incluso una versión razonable de la aproximación de Copenhague estándar requiere una segunda ecuación. Además, la inclusión de ondas y partículas produce un

enorme beneficio: restaura la idea de objetos que se mueven de aquí para allí a lo largo de trayectorias definidas, un regreso a una característica básica y familiar de la realidad que los copenhaguistas han persuadido a todos a abandonar quizá con demasiada rapidez. Críticas más técnicas son que la aproximación es *no local* (la nueva ecuación muestra que influencias ejercidas en un lugar parecen afectar instantáneamente a lugares distantes) y que es difícil reconciliar la aproximación con la relatividad especial. La potencia de la primera crítica queda rebajada por el reconocimiento de que incluso la aproximación de Copenhague tiene características no locales que, además, han sido confirmadas experimentalmente. Sin embargo, el último punto concerniente a la relatividad es ciertamente importante y aún no está plenamente resuelto.

Parte de la resistencia a la teoría de de Broglie-Bohm se debía a que el formalismo matemático de la teoría no siempre ha estado presente en su forma más directa. Para el lector con inclinación matemática, aquí está la derivación más directa de la teoría.

Empezamos con la ecuación de Schrödinger para la función de onda de una partícula: $H\psi = i\hbar\frac{d\psi}{dt}$, donde la densidad de probabilidad de que la partícula esté en la posición x, $p(x)$, está dada por la ecuación estándar $p(x) = |\psi(x)|^2$. Entonces, imaginemos que se asigna una trayectoria definida a la partícula, con velocidad en x dada por una función $v(x)$. ¿Qué condición física debería satisfacer esta función velocidad? Ciertamente, debería asegurar la conservación de probabilidad: si la partícula se está moviendo con velocidad $v(x)$ de una región a otra, la densidad de probabilidad debería ajustarse en consecuencia: $\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\nu)}{\partial x} = 0$. Ahora es sencillo resolver para $v(x)$ y encon-

trar $v(x,t) = \dfrac{-1}{\rho(x,t)} \int \dfrac{\partial \rho}{\partial t} = \dfrac{\hbar}{m}$, donde *m* es la masa de la partícula.

Junto con la ecuación de Schrödinger, esta última ecuación define la teoría de de Broglie-Bohm. Nótese que esta última ecuación es no lineal, pero esto no afecta a la ecuación de Schrödinger, que retiene su plena linealidad. La interpretación adecuada, entonces, es que esta aproximación para llenar las lagunas que deja la interpretación de Copenhague añade una nueva ecuación, que depende de forma no lineal de la función de onda. Toda la potencia y belleza de la ecuación de onda subyacente, la de Schrödinger, es plenamente conservada.

También podría añadir que la generalización a muchas partículas es inmediata: en el segundo miembro de la nueva ecuación, sustituimos la función de onda del sistema multipartícula: $\psi(x_1, x_2, x_3 \ldots, x_n)$, y al calcular la velocidad de la partícula *k*-ésima tomamos la derivada con respecto a la coordenada *k*-ésima (trabajando, por comodidad, en un espacio unidimensional; para dimensiones más altas, incrementamos adecuadamente el número de coordenadas). Esta ecuación generalizada manifiesta la no localidad de esta aproximación: la velocidad de la partícula *k*-ésima depende, instantáneamente, de las posiciones de todas las demás partículas (pues las coordenadas de las partículas son los argumentos de la función de onda). <<

[130] He aquí un experimento concreto en teoría para distinguir las aproximaciones de Copenhague y de muchos mundos. Un electrón, como todas las demás partículas elementales, tiene una propiedad conocida como *espín*. De un modo similar a como una peonza puede girar en torno a un eje, también puede hacerlo un electrón, con una diferencia significativa que es que la velocidad de este giro, sea cual sea la dirección del eje, es siempre la misma. Es una propiedad intrínseca del electrón, como su masa o su carga eléctrica. La única variable es si el giro

es en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario alrededor de un eje. Si es en sentido contrario decimos que el espín del electrón respecto a dicho eje es *arriba*; si es en el sentido de las agujas, decimos que el espín del electrón es *abajo*. Debido a la incertidumbre mecano-cuántica, si el espín del electrón está definido respecto a un eje —digamos, con un 100 por 100 de certeza de que su espín es arriba respecto al eje *z*—, entonces su espín respecto a los ejes *x* o *y* es incierto: respecto al eje *x* el espín sería 50 por 100 arriba y 50 por 100 abajo; y lo mismo para el eje *y*.

Imaginemos, entonces, que partimos de un electrón cuyo espín respecto al eje *z* es 100 por 100 arriba y luego medimos su espín respecto al eje *x*. Según la aproximación de Copenhague, si usted encuentra espín abajo, eso significa que la onda de probabilidad para el espín del electrón ha colapsado: la posibilidad espín-arriba se ha borrado de la realidad, lo que deja el único pico en espín-abajo. En la aproximación de muchos mundos, por el contrario, ocurre tanto el resultado espín-arriba como espín-abajo, de modo que, en particular, la posibilidad espín-arriba sobrevive intacta.

Para decidir entre estas dos representaciones, imaginemos lo siguiente. Una vez que usted ha medido el espín respecto al eje *x*, hacemos que alguien *invierta* por completo la evolución física. (Las ecuaciones fundamentales de la física, incluida la ecuación de Schrödinger, son invariantes frente a la inversión del tiempo, lo que significa, en particular, que, al menos en principio, cualquier evolución puede deshacerse. Véase *El tejido del cosmos* para una discusión de esta cuestión). Tal inversión se aplicaría a todo: al electrón, al equipamiento, y a cualquier otra cosa que forma parte del experimento. Ahora bien, si la aproximación de los muchos mundos es correcta, una medida posterior del espín del electrón respecto al eje *z* debería dar, con un 100 por 100 de certeza, el valor con el que empezamos: espín-arriba.

Sin embargo, si la aproximación de Copenhague es correcta (por lo que entiendo una versión matemáticamente coherente de ella, tal como la formulación de Ghirardi-Rimini-Weber), encontraríamos una respuesta diferente. Copenhague dice que al medir el espín del electrón respecto al eje *x*, en el que encontramos espín-abajo, la posibilidad espín-arriba fue aniquilada. Fue borrada del libro de balance de la realidad. Y así, al invertir la medida no volvemos a nuestro punto de partida porque hemos perdido para siempre parte de la onda de probabilidad. Entonces, en una medida posterior del espín del electrón respecto al eje *z* ya no hay un 100 por 100 de certeza de que obtengamos la misma respuesta con la que partimos. En su lugar, resulta que hay una probabilidad del 50 por 100 de que la obtengamos y una probabilidad del 50 por 100 de que no la obtengamos. Si usted hiciera este experimento repetidamente, y si la aproximación de Copenhague es correcta, la mitad de las veces, en promedio, usted no recuperaría la misma respuesta que tenía inicialmente para el espín del electrón respecto al eje *z*. El problema, por supuesto, está en realizar la plena inversión de la evolución física. Pero, en principio, éste es un experimento que daría ideas sobre cuál de las dos teorías es correcta. <<

[131] Einstein emprendió cálculos dentro de la relatividad general para demostrar matemáticamente que configuraciones extremas de Schwarzschild —que ahora llamaríamos un agujero negro— no podían existir. Las matemáticas subyacentes tras sus cálculos eran invariablemente correctas. Pero él hacía hipótesis adicionales que, dado el intenso pliegue del espacio y el tiempo que causaría un agujero negro, resultaban demasiado restrictivas; en esencia, la hipótesis excluía la posibilidad de implosión de materia. Las hipótesis significaban que la formulación matemática de Einstein no tenía flexibilidad para revelar la posibilidad de que los agujeros negros fueran reales. Pero esto era un artificio de la aproximación de Einstein, y no una indica-

ción de si los agujeros negros podrían o no formarse realmente. El moderno conocimiento deja claro que la relatividad general permite soluciones de agujero negro. <<

[132] Por el momento bastará esta vaga definición; pronto seré más preciso. <<

[133] Una vez que un sistema alcanza una configuración de máxima entropía (tal como vapor, a una temperatura fija, que está uniformemente distribuido en un recipiente), habrá agotado su capacidad para un aumento de entropía aún mayor. Así, el enunciado más preciso es que la entropía tiende a aumentar, hasta que alcanza el máximo valor que puede soportar el sistema. <<

[134] Grupo de mimos estadounidenses que actúan con máscaras azules que borran todos sus rasgos y les hacen difíciles de distinguir. (*N. del t.*) <<

[135] En 1972, James Bardeen, Brandon Carter y Stephen Hawking elaboraron las leyes matemáticas subyacentes a la evolución de los agujeros negros, y encontraron que las ecuaciones eran similares a las de la termodinámica. Para traducir entre los dos conjuntos de leyes, todo lo que uno tenía que hacer era sustituir «área del horizonte de un agujero negro» por «entropía» (y viceversa), y «gravedad en la superficie del agujero negro» por «temperatura». Así, para que sea válida la idea de Bekenstein —para que esta similitud no sea tan sólo una coincidencia, sino que refleje el hecho de que los agujeros negros tienen entropía—, los agujeros negros tendrían que tener también una temperatura no nula. <<

[136] En el capítulo 3 discutíamos cómo la energía encarnada por un campo gravitatorio puede ser negativa; esta energía, sin embargo, es energía potencial. La energía que estamos discutiendo aquí, energía cinética, procede de la masa del electrón y su movimiento. En física clásica tiene que ser positiva. <<

[137] La razón para el cambio aparente en la energía no es ni mucho menos obvia; se basa en una íntima conexión entre energía y tiempo. Usted puede considerar la energía de una partícula como la velocidad de vibración de su campo cuántico. Al notar que el propio significado de velocidad invoca el concepto de tiempo, se pone de manifiesto una relación entre energía y tiempo. Ahora bien, los agujeros negros tienen un efecto profundo en el tiempo. Desde un punto de vista distante, el tiempo parece frenarse para un objeto que se aproxima al horizonte de un agujero negro, y llega a detenerse en el mismo horizonte. Al cruzar el horizonte, tiempo y espacio intercambian sus papeles. Dentro del agujero negro, la dirección radial se convierte en la dirección temporal. Esto implica que dentro del agujero negro la noción de energía positiva coincide con movimiento en la dirección radial hacia la singularidad del agujero negro. Cuando el miembro de energía negativa de un par de partículas cruza el horizonte, cae realmente hacia el centro del agujero negro. Así, la energía negativa que tenía desde la perspectiva de alguien que observa desde lejos se hace energía positiva desde la perspectiva de alguien situado dentro del propio agujero negro. Esto hace del interior de un agujero negro un lugar donde tales partículas pueden existir. <<

[138] Cuando un agujero negro se contrae, la superficie de su horizonte de sucesos también se contrae, lo que está en conflicto con la afirmación de Hawking de que la superficie total aumenta. Recordemos, sin embargo, que el teorema del área de Hawking se basa en la relatividad general clásica. Ahora estamos teniendo en cuenta procesos cuánticos y llegando a una conclusión más refinada. <<

[139] Además de volver las monedas, usted también podría intercambiar sus posiciones, pero con el fin de ilustrar las ideas principales, ignoraremos esta complicación. <<

[140] Para ser un poco más precisos, es el número mínimo de preguntas sí-no cuyas respuestas especifican unívocamente los detalles microscópicos del sistema. <<

[141] Hawking encontró que la entropía es el área del horizonte de sucesos en unidades de Planck, dividida por cuatro. <<

[142] Para que se desarrollen todas las ideas que se van a describir en este capítulo, todavía tiene que resolverse por completo la cuestión de la constitución microscópica de un agujero negro. Como mencioné en el capítulo 4, en 1996 Andrew Strominger y Cumrun Vafa descubrieron que si se rebaja (matemáticamente) poco a poco la intensidad de la gravedad, entonces algunos agujeros negros se transforman en colecciones particulares de cuerdas y branas. Contando los reordenamientos posibles de estos ingredientes, Strominger y Vafa recuperaron, de la manera más explícita nunca alcanzada, la famosa fórmula de entropía de agujero negro de Hawking. Incluso así, ellos no fueron capaces de describir estos ingredientes para una intensidad gravitatoria más alta, es decir, cuando se forma realmente el agujero negro. Otros autores, tales como Samir Mathur y varios de sus colaboradores, han propuesto otras ideas, tales como la posibilidad de que los agujeros negros sean lo que ellos llaman «bolas borrosas», acumulaciones de cuerdas vibrantes desperdigadas en el interior del agujero negro. Estas ideas siguen siendo tentativas. Los resultados que discutimos más adelante en este capítulo (en la sección «Teoría de cuerdas y holografía») proporcionan algunas de las ideas más agudas sobre esta cuestión. <<

[143] Si usted está interesado en la historia completa, le recomiendo efusivamente el excelente libro de Leonard Susskind, *La guerra de los agujeros negros*. <<

[144] Más exactamente, la gravedad puede anularse en una región del espacio al entrar en un estado de movimiento en caída

libre. El tamaño de la región depende de las escalas en las que varía el campo gravitatorio. Si el campo gravitatorio varía sólo sobre grandes escalas (es decir, si el campo gravitatorio es uniforme, o casi), su movimiento en caída libre anulará la gravedad en una gran región del espacio. Pero si el campo gravitatorio varía sobre escalas de corta distancia —digamos, la escala de su cuerpo—, entonces usted podría anular la gravedad en sus pies pero sentirla aún en su cabeza. Esto se hace particularmente relevante más tarde en su caída, porque el campo gravitatorio se hace cada vez más intenso cuanto más se acerca a la singularidad del agujero negro; su intensidad crece rápidamente a medida que disminuye su distancia a la singularidad. La rápida variación significa que no hay modo de anular los efectos de la singularidad, que finalmente estirarán su cuerpo hasta su punto de ruptura, puesto que el tirón gravitatorio sobre sus pies, si usted salta con los pies por delante, será cada vez más fuerte que el tirón sobre su cabeza. <<

[145] El lector familiarizado con los agujeros negros advertirá que incluso sin las consideraciones cuánticas que llevan a la radiación de Hawking, las dos perspectivas diferirían con respecto al ritmo de paso del tiempo. La radiación de Hawking hace las perspectivas todavía más diferentes. <<

[146] Esta discusión ejemplifica el descubrimiento, hecho en 1976 por William Unruh, que vincula el movimiento de uno con las partículas que encuentra. Unruh encontró que si usted acelera a través de un espacio, por lo demás vacío, encontrará un baño de partículas a una temperatura determinada por su movimiento. La relatividad general nos da instrucciones para determinar el ritmo de la aceleración de uno por comparación con el banco de pruebas establecido por observadores en caída libre (véase *El tejido del cosmos*, capítulo 3). Un observador distante, no en caída libre, ve así radiación que emerge de un agujero negro; un observador en caída libre no la ve. <<

[147] Se forma un agujero negro si la masa *M* dentro de una esfera de radio *R* es $c^2R/2G$, donde *c* es la velocidad de la luz y *G* es la constante de Newton. <<

[148] En realidad, cuando la materia colapsara bajo su propio peso y se formara un agujero negro, el horizonte de sucesos estaría generalmente localizado dentro de la frontera de la región que hemos estado discutiendo. Esto significaría que hasta entonces no habríamos maximizado la entropía que la propia región podía contener. Eso es fácil de remediar. Arrojamos más material dentro del agujero negro, lo que hace que el horizonte de sucesos se hinche hasta la frontera original de la región. Puesto que la entropía aumentaría de nuevo gracias a este proceso algo más elaborado, la entropía del material que ponemos dentro de la región sería menor que la del agujero negro que llena la región, es decir, el área de la superficie de la región en unidades de Planck. <<

[149] G. 't Hooft, «Dimensional Reduction in Quantum Gravity». En *Salam Festschrift*, ed. por A. Ali, J. Ellis y S. Randjbar-Daemi (River Edge, N. J., World Scientific, 1993), pp. 284-296 (QCD161:C512:1993). <<

[150] Hemos discutido que la luz «cansada» o «agotada» es una luz cuya longitud de onda está estirada (desplazada hacia el rojo) y la frecuencia vibracional está reducida en virtud de haber gastado su energía trepando desde un agujero negro (o alejándose de una fuente de gravedad). Como sucede con los procesos cíclicos más familiares (la órbita de la Tierra en torno al Sol, la rotación de la Tierra alrededor de su eje, etc.), las vibraciones de la luz pueden utilizarse para definir el tiempo transcurrido. De hecho, las vibraciones de la luz emitida por átomos excitados de cesio-133 son ahora utilizadas por los científicos para definir el segundo. La frecuencia vibracional más lenta de la luz cansada implica así que el paso del tiempo cerca del agu-

jero negro —tal como lo ve el observador distante— es también más lento. <<

[151] Hay una historia relacionada que no he contado en este capítulo, y tiene que ver con un viejo debate acerca de si los agujeros negros requieren una modificación de la mecánica cuántica —si, al engullir la información, invierten la capacidad para que las ondas de probabilidad evolucionen hacia delante en el tiempo—. Un resumen en pocas palabras es que el resultado de Witten, al establecer una equivalencia entre un agujero negro y una situación física que *no* destruye información (una teoría cuántica de campos caliente), proporcionaba una prueba concluyente de que toda la información que cae en un agujero negro está en última instancia disponible para el mundo exterior. La mecánica cuántica no necesita modificación. Esta aplicación del descubrimiento de Maldacena establece también que la teoría en la frontera proporciona una descripción completa de la información (entropía) almacenada en la superficie de un agujero negro. <<

[152] Con la mayoría de los descubrimientos importantes en ciencia, el resultado culminante se basa en una colección de trabajos anteriores. Eso es lo que sucede aquí. Además de T. Hooft, Susskind y Maldacena, entre los investigadores que ayudaron a allanar el camino a este resultado y desarrollar sus consecuencias se encuentran Steve Gubser, Joe Polchinski, Alexander Polyakov, Ashoke Sen, Andy Strominger, Cumrun Vafa, Edward Witten y muchos otros.

Para el lector con inclinación matemática, el enunciado más preciso del resultado de Maldacena es el siguiente. Sea N el número de tres-branas en el conjunto de branas, y sea g el valor de la constante de acoplamiento en la teoría de cuerdas Tipo IIB. Cuando gN es un número pequeño, mucho menor que uno, la física está bien descrita por cuerdas de baja energía que se mueven en el conjunto de branas. A su vez, tales cuerdas están bien

descritas por una particular teoría cuántica de campos tetradimensional, supersimétrica y conformemente invariante. Pero cuando *gN* es un número grande, esta teoría de campos está fuertemente acoplada, lo que hace difícil su tratamiento analítico. Sin embargo, en este régimen, el resultado de Maldacena es que podemos utilizar la descripción de cuerdas que se mueven en la geometría cercana al horizonte del conjunto de branas, que es $AdS_5 \times S^5$ (cinco-espacio anti-de Sitter multiplicado por la cinco-esfera). El radio de estos espacios está controlado por *gN* (en concreto el radio es proporcional a $(gN)^{1/4}$), y así para *gN* grande, la curvatura de $AdS_5 \times S^5$ es pequeña, lo que asegura que los cálculos en teoría de cuerdas son manejables (en particular, se aproximan bien por cálculos en una modificación particular de la gravedad einsteniana). Por consiguiente, cuando el valor de *gN* varía de valores pequeños a grandes, la física se transforma de estar descrita por una teoría cuántica de campos tetradimensional, supersimétrica y conformemente invariante a estar descrita por una teoría de cuerdas decadimensional en $AdS_5 \times S^5$. Ésta es la denominada correspondencia AdS/CFT (espacio anti-de Sitter/teoría de campos conforme). <<

[153] Aunque una demostración completa del argumento de Maldacena está fuera de nuestro alcance, en años recientes el vínculo entre descripciones de volumen y de frontera se ha entendido cada vez mejor. Por ejemplo, se ha identificado una clase de cálculos cuyos resultados son precisos para cualquier valor de la constante de acoplamiento. Por ello, pueden seguirse explícitamente los resultados cuando se pasa de valores pequeños a valores grandes. Esto ofrece una ventana al proceso de «transformación» por el que una descripción de la física desde la perspectiva del volumen se transforma en una descripción en la perspectiva de frontera, y viceversa. Tales cálculos han mostrado, por ejemplo, cómo cadenas de partículas interactuantes desde la perspectiva de la frontera pueden transformarse en

cuerdas en la perspectiva de volumen —una interpolación particularmente convincente entre las dos descripciones—. <<

[154] Más exactamente, esto es una variación sobre el resultado de Maldacena, modificado de modo que la teoría cuántica de campos en la frontera no es la que apareció originalmente en sus investigaciones, sino que en su lugar se aproxima estrechamente a la cromodinámica cuántica. Esta variación también implica modificaciones paralelas en la teoría de volumen. En concreto, siguiendo el trabajo de Witten, la alta temperatura de la teoría de frontera se traduce en un agujero negro en la descripción interior. A su vez, el diccionario entre las dos descripciones muestra que los difíciles cálculos de la viscosidad del plasma quark-gluón se traducen en la respuesta del horizonte de sucesos del agujero negro a deformaciones particulares, un cálculo técnico pero tratable. <<

[155] Otra aproximación para dar una definición plena de la teoría de cuerdas surgió del trabajo previo en un área llamada teoría matriz (otro posible significado de la «M» en la teoría-M), desarrollada por Tom Banks, Willy Fischler, Steve Shenker y Leonard Susskind. <<

[156] El número que cité, 10^{55} gramos, da cuenta de los contenidos del universo observable hoy, pero en tiempos cada vez más remotos la temperatura de estos constituyentes sería mayor y por ello contendrían una energía más alta. El número 10^{65} gramos es una mejor estimación de lo que usted necesitaría reunir en una mota minúscula para recapitular la evolución de nuestro universo desde cuando tenía aproximadamente un segundo. <<

[157] Usted podría pensar que debido a que su velocidad está restringida a ser menor que la velocidad de la luz, su energía cinética también estará limitada. Pero no es así. Conforme su velocidad se acerca cada vez más a la de la luz, su energía se hace

cada vez mayor; de acuerdo con la relatividad especial, no tiene límites. Matemáticamente, la fórmula para su energía es: $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, donde c es la velocidad de la luz y v es su velocidad. Note también que la discusión es desde la perspectiva de alguien que le observa caer, digamos alguien que está en reposo en la superficie de la Tierra. Desde la perspectiva de usted, aunque está en caída libre, usted está en reposo y toda la materia que le rodea está adquiriendo velocidad creciente. <<

[158] Con nuestro actual nivel de comprensión, hay una flexibilidad significativa en estas estimaciones. El número «10 gramos» procede de la siguiente consideración: se piensa que la escala de energías en la que tiene lugar la inflación es de unas 10^{-5} veces la escala de energía de Planck, y esta última es del orden de 10^{19} veces la energía equivalente de la masa de un protón. (Si la inflación ocurriera en una escala de energía más alta, los modelos sugieren que ya debería haberse detectado evidencia de ondas gravitatorias producidas en el universo primitivo). En unidades más convencionales, la escala de Planck es del orden de 10^{-5} gramos (pequeña para los niveles cotidianos, pero enorme para las escalas de la física de partículas elementales, donde tales energías serían llevadas por las partículas elementales). Por lo tanto, la densidad de energía de un campo inflatón habría sido de unos 10^{-5} gramos empaquetados en cada volumen cúbico cuya dimensión lineal está fijada en aproximadamente 10^5 veces la longitud de Planck (recordemos, de la incertidumbre cuántica, que las escalas de energías y longitudes están en relación inversa), es decir, unos 10^{-28} centímetros. La masa-energía total que lleva dicho campo inflatón en un volumen de 10^{-26} centímetros de lado es entonces: 10^{-5} gramos/(10^{-28} centímetros)^3 × (10^{-26} centímetros)^3, que es unos 10 gramos. Los lectores de *El tejido del cosmos* quizá recuerden que yo utilizaba allí un valor ligeramente diferente. La diferencia procedía

de la hipótesis de que la escala de energía del inflatón era ligeramente más alta. <<

[159] Resulta irónico que una explicación de por qué nunca se han encontrado monopolos magnéticos (incluso si los predicen muchas aproximaciones a teorías unificadas) es que su población fue diluida por la rápida expansión del espacio que tiene lugar en la cosmología inflacionaria. La sugerencia que se está haciendo ahora es que los propios monopolos magnéticos pueden desempeñar un papel en iniciar futuros episodios inflacionarios. <<

[160] Hans Moravec, *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind* (New York, Oxford University Press, 2000). Véase también Ray Kurzweil, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology* (New York, Penguin, 2006). <<

[161] Otro agujero aparece por una encarnación del problema de la medida del capítulo 7. Si el número de universos reales (no virtuales) es infinito (si somos parte de, digamos, el multiverso mosaico), entonces habrá una colección infinita de mundos como el nuestro en el que los descendientes ejecuten simulaciones, que dan un número infinito de mundos simulados. Incluso si siguiera pareciendo que el número de mundos simulados sobrepasaría en mucho a los reales, vimos en el capítulo 7 que comparar infinitos es un asunto traicionero. <<

[162] Véase, por ejemplo, Robin Hanson, «How to Live in a Simulation», *Journal of Evolution and Technology* 7, n.° 1 (2001). <<

[163] Una teoría que permite sólo un número finito de estados distintos dentro de un volumen espacial finito (en acuerdo, por ejemplo, con las cotas de entropía discutidas en el capítulo anterior) aún puede incluir cantidades continuas como parte de su formalismo matemático. Éste es el caso, por ejemplo, de la mecánica cuántica: el valor de la onda de probabilidad puede va-

riar de forma continua incluso cuando sólo son posibles un número finito de resultados diferentes. <<

[164] La tesis de Church-Turing afirma que cualquier computador del tipo denominado máquina de Turing universal puede simular las acciones de otro, y por ello es perfectamente razonable que un computador que está dentro de la simulación —y así está él mismo simulado por el computador padre que ejecuta el mundo simulado— realice tareas particulares equivalentes a las emprendidas por el computador padre. <<

[165] El filósofo David Lewis desarrolló una idea similar mediante lo que él llamó realismo modal. Ver *On the Plurality of Worlds* (Malden, Mass., Wiley-Balckwell, 2001). Sin embargo, la motivación de Lewis al introducir todos los universos posibles difiere de la de Nozick. Lewis buscaba un contexto donde, por ejemplo, enunciados contrafácticos (tales como «si Hitler hubiera ganado la guerra, el mundo sería hoy muy diferente») estuvieran ejemplificados. <<

[166] Borges permite libros con todas las cadenas de caracteres posibles, sin atender al significado. <<

[167] John Barrow ha hecho una afirmación similar en *Pi in the Sky* (New York Little, Brown, 1992). <<

[168] Como se ha explicado en la nota 10 al capítulo 7, el tamaño de este infinito supera al de la colección infinita de números enteros 1, 2, 3… y así sucesivamente. <<

[169] Cuando discutimos el multiverso mosaico (capítulo 2) hice hincapié en que la física cuántica nos asegura que en cualquier región finita del espacio hay sólo un número finito de maneras en que puede disponerse la materia. Sin embargo, el formalismo matemático de la mecánica cuántica incluye aspectos que son continuos y que por lo tanto pueden tomar infinitos valores. Estos aspectos son cosas que no podemos observar directamente (tales como la altura de una onda de probabilidad

en un punto dado); las posibilidades finitas se refieren a los distintos resultados que puede dar una medida. <<

[170] Ésta es una variante de la famosa paradoja del barbero de Sevilla, en la que un barbero afeita a todos los que no se afeitan a sí mismos. Entonces, la pregunta es: ¿quién afeita al barbero? Normalmente se estipula que el barbero sea un varón, para evitar la respuesta fácil —el barbero es una mujer y no necesita afeitarse—. <<

[171] Schmidhuber señala que una estrategia eficaz sería hacer que el computador haga evolucionar cada universo simulado hacia adelante en el tiempo de una manera «encajada»: el primer universo sería actualizado cada dos pasos de tiempo del computador, el segundo universo sería actualizado cada dos de los pasos de tiempo restantes, el tercer universo sería actualizado cada dos de los pasos de tiempo no dedicados a los dos primeros universos, y así sucesivamente. A su debido tiempo, cada universo computable sería hecho evolucionar hacia adelante por un número de pasos de tiempo arbitrariamente grande. <<

[172] Max Tegmark ha señalado que la totalidad de una simulación, ejecutada de principio a fin, es una colección de relaciones matemáticas. Así pues, si uno cree que todas las matemáticas son reales, también lo es esta colección. A su vez, desde esta perspectiva no hay necesidad de ejecutar realmente ninguna simulación por computador, puesto que las relaciones matemáticas que produciría cada una son ya reales. Además, notemos que poner el foco sobre evolucionar una simulación hacia adelante en el tiempo, por intuitivo que sea, es muy restrictivo. La computabildad de un universo debería evaluarse examinando la computabilidad de las relaciones matemáticas que definen su historia completa, describan o no estas relaciones el despliegue de la simulación a través del tiempo. <<

[173] Una discusión más refinada de funciones computables y no computables incluiría también *funciones computables en el límite*. Éstas son funciones para las que hay un algoritmo finito que las evalúa cada vez con más precisión. Por ejemplo, éste es el caso para generar los dígitos de π: un computador puede generar cada dígito sucesivo de π, incluso si nunca llegará a terminar el cálculo. Así, aunque estrictamente hablando π es no computable, es computable en el límite. En su mayoría, los números reales, sin embargo, no son como π. No sólo son no computables, sino que tampoco son computables en el límite.

Cuando consideramos simulaciones «satisfactorias», deberíamos incluir las basadas en funciones computables en el límite. En principio, una realidad convincente podría ser generada por la salida parcial de un computador que evalúa funciones computables en el límite.

Para que las leyes de la física sean computables, o al menos computables en el límite, habría que abandonar la tradicional dependencia de los números reales. Esto se aplicaría no sólo al espacio y el tiempo, normalmente descritos utilizando coordenadas cuyos valores pueden recorrer los números reales, sino también para todos los demás ingredientes matemáticos que utilizan las leyes. La intensidad de un campo electromagnético, por ejemplo, podría no variar sobre los números reales, sino sólo sobre un conjunto de valores discretos. Y lo mismo para la probabilidad de que un electrón esté aquí o allí. Schmidhuber ha resaltado que todos los cálculos que los físicos han realizado han supuesto la manipulación de símbolos discretos (escritos sobre papel, sobre una pizarra, o introducidos en un computador). Y así, incluso si este corpus de trabajo científico ha sido visto siempre como algo que supone los números reales, en la práctica no lo hace. Y lo mismo para todas las magnitudes que han sido medidas. Ningún dispositivo tiene una precisión infinita, y por ello nuestras medidas siempre implican salidas nu-

méricas discretas. En ese sentido, todos los éxitos de la física pueden leerse como éxitos de un paradigma digital. Quizá, entonces, las verdaderas leyes son, de hecho, computables (o computables en el límite).

Hay muchas perspectivas diferentes sobre la posibilidad de «física digital». Véase, por ejemplo, *A New Kind of Science,* de Stephen Wolfram (Champaign, Ill., Wolfram Media, 2002) y *Programming the Universe*, de Seth Lloyd (New York, Alfred A. Knopf, 2006). El matemático Roger Penrose cree que la mente humana se basa en procesos no computables, y por ello el universo en que habitamos debe incluir funciones matemáticas no computables. Desde esta perspectiva, nuestro universo no entra en el paradigma digital. Véase, por ejemplo, *The Emperor's New Mind* (New York, Oxford University Press, 1989) y *Shadows of the Mind* (New York, Oxford University Press, 1994). <<

[174] Nótese, como en el capítulo 7, que una refutación observacional incuestionable de la inflación requeriría el compromiso de la teoría con un procedimiento para comparar clases infinitas de universos —algo que todavía no se ha conseguido—. Sin embargo, la mayoría de los participantes estaría de acuerdo en que si, digamos, los datos del fondo de microondas hubieran parecido diferentes de la Figura 3.4, su confianza en la inflación se habría venido abajo, incluso si, de acuerdo con la teoría, hay un universo burbuja en el multiverso inflacionario en el que los datos fueran válidos. <<

[175] Steven Weinberg, *The First Three Minutes* (New York, Basic Books, 1973), p. 131. <<

ÍNDICE